

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektroenergetiky

Analýza hřídelových napětí a prošetření vlivů působících  
na vznik ložiskových proudů asynchronních motorů

Analysis of shaft Voltages and Investigation of Influence  
Affected on Bearings Currents Origin of Asynchronous  
Motors

2017

Petr Galuška

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Petr Galuška**  
Studijní program: N2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika  
Téma: **Analýza hřídelových napětí a prošetření vlivů působících na vznik  
ložiskových proudů asynchronních motorů**  
**Analysis of shaft Voltages and Investigation of Influence Affected on  
Bearings Currents Origin of Asynchronous Motors**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

- 1) Úvod do problematiky vzniku hřídelových napětí a ložiskových proudů
- 2) Rozbor používaných metod diagnostiky ložiskových proudů
- 3) Měření na různých typech asynchronních motorů
- 4) Vyhodnocení a návrh vhodných opatření pro eliminaci ložiskových proudů
- 5) Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:


- 1) Petrov, G.N.-Elektrické stroje 2, Academia 1982
- 2) Boldea, I.; Nasar, S.A.-The Induction Machine Handbook, CRC Press 2001
- 3) Černý, Z.; Čaha, M.- Elektrické pohony, SNTL 1990
- 4) Hrabovcová, V. a kol.- Meranie a modelovanie elektrických strojov, Žilina 2000
- 5) Pospíšilík, J.; Chmelík, K.; Foldyna, J.- Ložiskové proudy v elektrických strojích, Montanex 2008

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Václav Čech, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017

  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

**Prohlášení:**

„ Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární  
prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

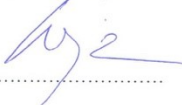
  
.....

V Kunovicích

26. dubna. 2017

Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v magisterských programech VŠB-TU Ostrava.

Ing. Martin Bajer



Vedoucí Research & Development

Siemens s.r.o, o.z. Elektromotory Frenštát

25.4.2014

Ve Frenštátě pod Radhoštěm



**Poděkování:**

Je mi velkým potěšením, že na tomto místě mohu poděkovat vedoucímu mé práce, panu Ing. Václavu Čechovi, PhD. Děkuji mu za jeho trpělivost a ochotu vést mou diplomovou práci. Za jeho čas, který mi vždy byl ochoten věnovat, za cenné rady a připomínky, které byly přínosem a inspirací pro mou práci. Firmě Siemens, za možnost spolupráce, poskytnuté podklady a kolegům za pomoc při měření.

Také bych velice rád poděkoval své rodině za psychickou a materiální podporu, během studia i při psaní této práce.

## **ABSTRAKT**

Předkládaná diplomová práce je zaměřená na problematiku konstrukce asynchronního stroje s kotvou nakrátko. Teoretický rozbor dané problematiky obsahuje teoretický podklad vybraných poruch pro zpracování praktické části. Další část práce je věnována praktickému měření. Prezentované výsledky jsou přehledně graficky zpracovány. Poslední část práce obsahuje celkové shrnutí a zhodnocení měřených výsledků.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Asynchronní motor s kotvou nakrátko, hřídelové napětí, ložiskové proudy, nesymetrie magnetického obvodu, nesymetrie vinutí, nesymetrie drážkování,

## **ABSTRAKT**

This diploma thesis is focused on the design of asynchronous machines with squirrel cage. Theoretical analysis of the issue contains the theoretical basis of selected disorders for the practical part. Another part is devoted to the practical measurement. The presented results are summarized graphically presented. The last part contains a summary of the Evaluation of the measured results.

## **KEY WORDS**

Asynchronous squirrel cage motor, shaft voltages, bearing currents, unbalance magnetic circuit, winding unbalance, unbalance gougin

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZNAČEK

$B$	magnetická indukce	(T)
$Q$	počet drážek	
$Q_1$	počet drážek statoru	
$Q_2$	počet drážek rotoru	
$R$	ohmický odpor elektrického obvodu ložiskových proudů	( $\Omega$ )
$I_{lv}$	efektivní hodnota $v$ -té harmonické ložiskového proudu	
$L$	indukčnost elektrického obvodu ložiskových proudů	(H)
$N_s$	počet segmentů ve jhu statoru	
$U_H$	hřídelové napětí	(V)
$U_{hv}$	efektivní hodnota $v$ -té harmonické hřídelového napětí	(V)
$U_i$	indukované napětí	(V)
$S_{j1}$	průřez jha statoru	(m)
$Z$	modul impedance	( $\Omega$ )
$a$	charakteristické číslo pro vznik hřídelového napětí podle Hause	
$c$	pólová rozteč trojfázového vinutí daná počtem drážek	
$q$	počet drážek na pól a fázi	
$n$	jmenovité otáčky stroje	(s <sup>-1</sup> )
$n_s$	synchronní otáčky stroje	(s <sup>-1</sup> )
$m$	počet fází	
$d$	největší společný dělit čísel $j, p$	
$f_1$	základní harmonická frekvence	(Hz)
$f_d$	frekvence dolního postranního pásma	(Hz)
$f_{dr}$	frekvence drážkování	(Hz)
$f_h$	frekvence horního postranního pásma	(Hz)
$f_m$	maximální frekvence	(Hz)
$f_s$	frekvence napětí sítě	(Hz)
$f_{vz}$	vzorkovací frekvence	(Hz)
$i_s$	okamžitá hodnota sdruženého proudu	(A)
$j$	počet magnetických nesymetrií statoru	
$l$	délka vodiče	(m)
$p$	počet pólových dvojic	
$s$	skluz	
$u_s$	okamžitá hodnota sdruženého napětí	(V)
$v$	rychlost vodiče	(m/s)
$v_1$	obvodová rychlost magnetického pole ve vzduchové mezeře	(m/s)
$v_2$	obvodová rychlost rotoru	(m/s)
$y$	krok vinutí	
$p$	počet pólových dvojic	
$t$	čas	(s)
$\alpha$	úhel vzájemného pootočení sousedních plechů ve svazku	
$\delta_0$	střední hodnota vzduchové mezery mezi statorem a rotorem	(m)

$\delta_{max}$	maximální hodnota vzduchové mezery mezi statorem a rotorem	(m)
$\Delta t$	interval vzorkování, kterému odpovídá vzorkovací frekvence	(s)
$\varepsilon$	šířka spár mezi segmenty ve jhu statoru	(m)
$\tau_{d1}$	drážková rozteč	
$\tau_p$	pólová rozteč	
$\nu$	násobná harmonická složka magnetického toku	
$\mu_0$	permeabilita vakua	(H/m)
$\mu_r$	poměrná permeabilita	(H/m)
$\Phi_j$	magnetický tok	(Wb)
$\Phi_{j\nu}$	amplituda kruhového magnetického toku ve jhu statoru	(Wb)
$\Phi_{jmin}$	maximální hodnota amplitudy magnetického toku ve jhu statoru	(Wb)
$\Phi_{jmax}$	minimální hodnota amplitudy magnetického toku ve jhu statoru	(Wb)
$\omega$	úhlová rychlost	(s <sup>-1</sup> )
$\omega_\nu$	kruhová frekvence dané harmonické	(s <sup>-1</sup> )

Úvod .....	10
<b>1 Vznik hřídelových napětí.....</b>	<b>11</b>
1.1 Hřídelové napětí a napětí na hřídeli.....	11
1.2 Hřídel jako zdroj.....	12
1.3 Vliv nesymetrie magnetického obvodu .....	13
1.4 Vliv drážkování statoru a rotoru.....	17
1.5 Vliv magnetické nesymetrie dané vinutím.....	20
<b>2 Rozbor používaných diagnostických metod.....</b>	<b>24</b>
2.1 Metody výpočetní.....	24
2.2 Metody měření .....	24
2.3 FFT analýza.....	25
2.4 Monitorování stavu.....	26
2.5 Vibrodiagnostika .....	28
2.6 Frekvenční analýza proudu a rozptylového magnetického pole .....	28
2.7 Tribodiagnostika.....	28
2.8 Zapojení jednotlivých měření.....	29
<b>3 Měření na různých typech asynchronních motorů .....</b>	<b>32</b>
3.1 Vliv magnetické nesymetrie na hřídelové napětí motoru.....	32
3.1.1 Měření motoru 1LE5504-3AB7 – délka rotoru 625 mm.....	33
3.1.2 Měření motoru 1LE5504-3AB7 – délka rotoru 618 mm.....	37
3.1.3 Měření hřídelových napětí na motoru 1LE1504-3AB7- rotor 625 mm .....	40
3.2 Vliv nesymetrie vinutí na hřídelové napětí motoru .....	42
3.2.1 Měření motoru 1LE5504-3AB7 – K2 .....	43
3.2.2 Měření motoru 1LE5504-3AB7 – KK.....	47
3.3 Vliv drážkování na hřídelové napětí motoru .....	54
3.3.1 Měření motoru 1LE5534-3AB73-4AB0 – 40 drážek .....	55
<b>4 Vyhodnocení a návrh vhodných opatření pro eliminaci ložiskových proudů.....</b>	<b>59</b>
4.1 Přemostění ložiska .....	59
4.1.1 Kartáče .....	59
4.1.2 Měření motoru 1LE5534-3AB73-4AB0 s použitými kartáči .....	60
4.1.3 Zkratovací kroužky.....	68
4.2 Izolování ložiska.....	68
4.3 Natáčením plechů.....	68
4.4 Vliv svorkového napětí na hřídelové napětí .....	69
<b>5 Závěr.....</b>	<b>70</b>
<b>6 Použitá literatura: .....</b>	<b>71</b>

## Úvod

Z historického hlediska byly asynchronní stroje obecně pro svou často zmiňovanou jednoduchost, snadnou údržbu a servis ceněným pomocníkem. Nahrazovaly a nahrazují tak se současným trendem dlouhodobě stabilní stejnosměrné motory. S myšlenkou využití Faradayova indukčního zákona přišel Nikola Tesla před více než 100 lety pro stavbu indukčního stroje na vícefázový střídavý proud. Pořizovací cena je jedním z mnoha aspektů využití asynchronního stroje nejen v domácnostech, ale hlavně v neustále se rozvíjícím průmyslu.

Dnešní asynchronní stroje se od svých předchůdců konstrukčně moc neliší. Princip jejich činnosti se od vzniku nezměnil. Elektromotory jsou používány jako měnič elektrické energie na mechanickou energii, mohou působit i opačně. Jejich činnosti lze pak využít například u malých vodních elektráren. Požadavky zákazníků a celkový vývoj zaznamenal výrazný posun.

Moderní stroje pro certifikaci musí splňovat normy a předpisy. S tím jsou spjaty určité toleranční standardy. Pro dobrou regulovatelnost asynchronních strojů se používají měniče frekvence. Výrobce garantuje životnost elektromotoru alespoň 20 let. Při použití moderního frekvenčního měniče u staršího typu elektromotoru může vyústit v rychlejší poškození stroje. Problémy nemusí způsobovat jen moderní elektronika. Konstrukcí, výrobou, provozováním a servisem se dnes výrobci při zpracování požadavků od zákazníka zabývají dnes a denně. Konstruktéři navrhnou vhodná konstrukční řešení pro splnění jejich požadavků. Velkou výhodou je možnost použití počítačů s implementovanými simulačními programy pro pomoc při návrhu, zjednodušení výrobního procesu a minimalizováním odpadů při výrobě. Každému konstrukčnímu dílu je potřeba věnovat náležitou pozornost již při samotném návrhu, tak jako celku. Zpětná analýza vzniklých poruch může být podnětem pro změnu technologie výroby či konstrukčního návrhu. Nesmí být opomíjeno ani diagnostikování strojů s následným servisem.

Začátek práce je věnován teoretickým pojmům, zejména co je příčinou vzniku hřídelového napětí. Další kapitola je věnována možnému měření a detekování vzniklých poruch ve stroji. Třetí kapitola je obsahuje měření pro jednotlivé příčiny vzniku hřídelového napětí popsané v první kapitole. Čtvrtá kapitola je věnována vyhodnocení měření s možnými opatřeními pro eliminaci ložiskových proudů. Závěr práce obsahuje shrnutí všech nashromážděných poznatků z předchozích statí této práce.

# 1 Vznik hřídelových napětí

## 1.1 Hřídelové napětí a napětí na hřídeli

Pro existenci hřídelového napětí musí být přítomny zdroje:

- a) zdroj elektrické energie, který vytvoří potenciál za poruchy nebo náhodně
- b) fyzikální procesy, které probíhají ve stroji samotném

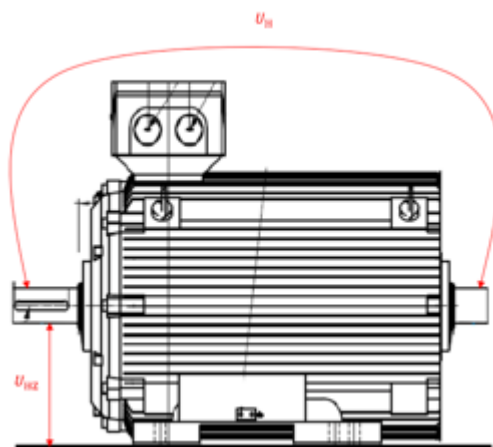
Dle obr.1., lze rozdělit napětí na hřídelové napětí a napětí proti zemi.

*Definice hřídelového napětí:*

Při práci asynchronního stroje dochází k vnitřnímu indukovaní napětí, a to buď časovou nebo prostorovou změnou magnetického toku. Při správné funkci asynchronního stroje se magnetický tok vybuzený vinutím statoru, uzavírá skrz magnetický obvod na rotoru. Důsledkem tohoto napětí mohou být jak nesymetrie ve stroji, tak i nevhodně zvolený návrh konstrukčních prvků.

Příčinou mohou být:

- 1) Nesymetrie obvodu, které mohou vyvolat na hřídeli stroje pulzaci magnetického toku.
- 2) Kapacity mezi statorovým vinutím a rotorem a také mezi rotorem a kostrou.
- 3) Konfigurace napájecího zdroje.
- 4) Potenciál na hřídeli stroje.
- 5) Přechodné napětí na svorkách motoru.
- 6) Součet vektorových smyček nulového vektoru u PWM vzorku frekvenčních měničů.
- 7) Výrobní, technické, montážní i provozní závady.



Obr. 1 Hřídelové napětí a napětí proti zemi

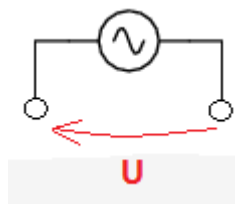
*Definice napětí na hřídeli:*

Přes kapacitní vazby jednotlivých součástí stroje, jako je kostra, štíty, ložiskové stojany u velkých strojů, plechy, vinutí, může vzniknout napětí na hřídeli. Vznik vyrovnávacích proudů je důsledkem propojení obou konců stroje hřídelí z feromagnetického materiálů a ložisky. V tomto případě tvoří hřídel jen přenosovou cestu.

## 1.2 Hřídel jako zdroj

Na rotor (hřídel) umístěný ve statorovém svazku je nutné pohlížet jako na elektrický napěťový zdroj, viz náhradní schéma (obr.2). Vnitřní (indukované) napětí tohoto zdroje je dle Faradayova indukčního zákona (1.1), pro prostorovou změnu magnetického toku.

$$U_i = B \cdot v \cdot l \cdot \sin \alpha \quad (1.1)$$



Obr. 2 Náhradní schéma

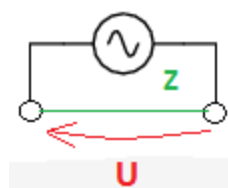
Na konce hřídele je tedy nutno pohlížet jako na svorky zdroje, mezi kterými bude vždy při rotujícím rotoru naměřeno hřídelové napětí. Jelikož dochází ke změně magnetického toku ve stroji a také prostorové změny magnetického pole (1.2)

$$u_i = N \frac{d\phi}{dt} = \frac{d\psi}{dt} \quad (1.2)$$

Napětí mezi kostrou a hřídelí naměřeno není, jelikož otáčející se hřídel je díky mazací vrstvě v ložiscích v podstatě izolovaná a neuzemněná (nepředstavuje tedy rozdílný potenciál vůči kostře). Tyto skutečnosti byly prověřeny měřením, které je zobrazeno v kapitole 4. Dále byla prověřována možnost použití kartáče, a to nejprve na straně NDE (Non Drive End), konec hřídele s umístěným ventilátorem. Tímto zkratováním se na straně NDE vůči kostře pochopitelně žádné napětí neobjevilo, pro použití kartáče na straně DE (Drive End - konec hřídele pro připojení pohonu), však hřídel vykazovala oproti kostře rozdílný potenciál. Takže mezi kostrou a DE stranou hřídele (skrze ložisko) bylo naměřeno napětí.

Principiálně stejná situace nastala v případě zkratování hřídele kartáčem na DE straně. V kapitole 4 je porovnání měření při použití kartáčů na obou stranách motoru. Tímto byl v podstatě vytvořen zkrat na svorkách zdroje (obr. 3).



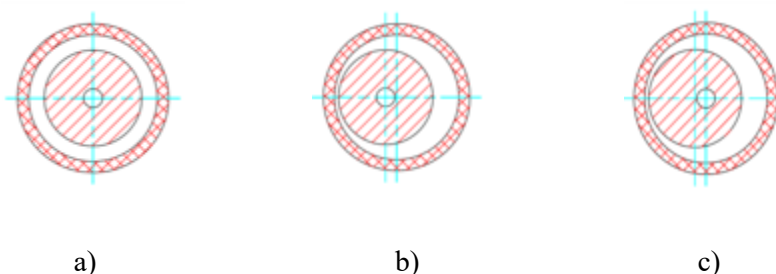


Obr. 3 Schéma zapojení

### 1.3 Vliv nesymetrie magnetického obvodu

#### Excentricita

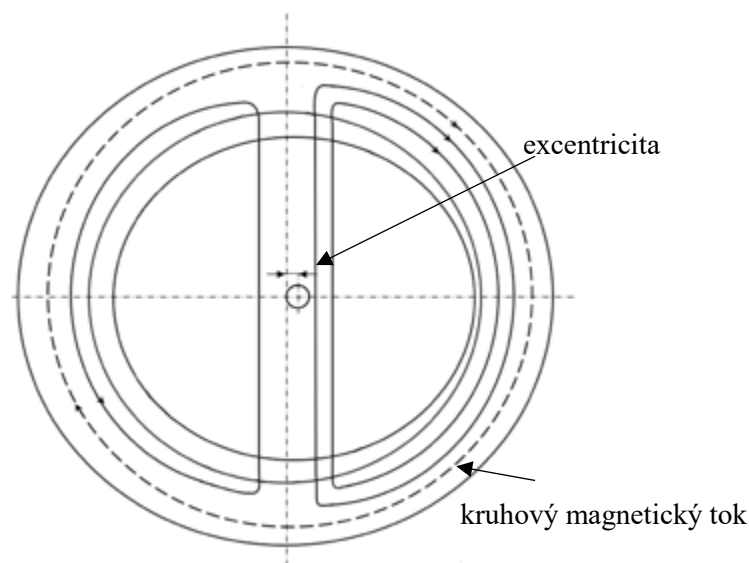
Nesymetrie magnetického obvodu může být způsobena *dynamickou* nebo *statickou excentricitou*.



Obr. 4 Rozložení statoru a rotoru pro a) normální stav, b) statická excentricita, c) dynamická excentricita [13]

- a) osy statoru i rotoru jsou vystředěny
- b) pozice rotoru vůči statoru je konstantní, kde je minimální radiální délka vzduchové mezery
- c) není osa rotoru v ose rotace a minimální vzduchová mezera rotuje spolu s rotorem

Jedním z důsledků nesymetrie může být v každém mnohápólovém elektrickém stroji, rozdělení toku každého pólu po překročení vzduchové mezery na dvě části, souslednou a protiběžnou část skrz jho. Je-li statorové vinutí napájeno sinusovým proudem, bude se v ideálním případě osa rotoru celou dobu nacházet v nulovém bodě magnetického pole vytvořeného státorem, pak magnetický tok prochází ze statorového vinutí skrz vzduchovou mezeru rotorem zpět do magnetického obvodu statoru. Dojde-li z nějakého důvodu k vytvoření excentricity, vznikne magnetická nesymetrie viz obr. 5. Vytvoří se radiální magnetické pole (vzduchová mezera a zuby), které vyvolá kruhové magnetické toky a hřídelové napětí v místech tangenciálního směru magnetického toku (jha). Dále vznikají periodické změny permeability v oblasti zlomu magnetizační charakteristiky pro stator a rotor v rozdílné míře. Vytvořený kruhový magnetický tok se bude uzavírat přes hřídel a pokud je střídavý, bude indukovat napětí v obvodu složeného z hřídele, ložiskového stojanu (ložiskového štítu) a kostry. Hřídel by následně protékal proud. Tento typ hřídelového proudu je zdaleka nejdůležitější. Hodnota hřídelového proudu by měla být přibližně konstantní jak naprázdno, tak i při plném zatížení.



Obr. 5 Excentricita a cirkulující tok [5]

U strojů velkých osových výšek je potřeba navíc brát v úvahu další nesymetrie magnetického obvodu:

### Nesymetrie prvního druhu

Vyskytuje se především u strojů, jejichž magnetický obvod je seskládán z více segmentů, ať už kvůli montáži, přepravě či manipulaci ve výrobě.

*Pravidlo(1): Dělení statoru bude způsobovat hřídelové proudy. Pokud je poměr dvojnásobného počtu spojů v čitateli ku počtu pólů ve jmenovateli, vyjádřený jako nejmenší poměr hodnot. Je-li čítec liché číslo, dojde ke vzniku hřídelových proudů. Pak bude jejich frekvence rovna tomuto čitateli krát síťová frekvence, dle rovnice (1.4). Je-li čítec sudé číslo, nebudou vznikat hřídelové proudy.*

Například se 4 spoji a 14 pólů, je poměr  $4/7$ , 4 je sudé číslo; neexistují žádné hřídelové proudy. Se 2 spoji a 8 pólů je poměr  $1/2$ , a se síťovou frekvencí jsou hřídelové proudy přítomny. Výše uvedené pravidlo se vztahuje pouze na stroje s rovnoměrně rozloženými a jednotnými spoji. Je-li stator rozdělen do nerovných úseků, pak musí být zvláštní pozornost věnována každému jednotlivému úseku. Prakticky v každém případě se spoje mezi sekcemi budou lišit natolik, že bude docházet vždy k mírné nesymetrii a tím i k malému hřídelovému proudu, i když v čitateli zlomku je sudé číslo v důsledku dvojnásobku spojů ku pólům. Avšak tyto náhodné proudy by neměly působit vážné problémy. Axiální chladicí otvory procházející skrz jádro pro ventilaci vzduchem, které se často používají ve vysokorychlostních strojích, jsou dalším zdrojem hřídelových proudů, nejsou-li umístěny symetricky vzhledem k pólům. V případě, že mají tyto ventilační stejný tvar a opakují se ve stejné pólové vzdálenosti nebude vznikat hřídelové napětí. Pokud ovšem tomu tak nebude, pak toto hřídelové napětí vzniká bude. Na druhou stranu, mohou být axiální otvory umístěny tak, aby částečně neutralizovali nesymetrii vzhledem ke spojům v jádru. Použití segmentového děrování má téměř stejné účinky jako rozdělení jádra. Spoje v segmentovaném jádru jsou provedeny přepletováním, namísto tupým spojením.

Z toho plyne, že výše uvedené pravidlo (1) lze použít rovněž v případě segmentových konstrukcí.

*(2) Použití symetrického rozdělení otvorů má za následek hřídelové proudy, pokud je počet segmentů vůči pólům čtyřnásobný, vyjádřen jako nejmenší poměr hodnot. Je-li ve výsledku liché číslo v čitateli, pak frekvence hřídelových proudů bude rovna čitateli krát síťová frekvence.*

Je-li počet nesymetrií rovnoměrně rozložených po obvodu statoru  $j$ , počet pólů stroje  $p$ , a je-li  $d$  největší společný dělitel čísel  $j$  a  $p$ , pak dle pravidla (1) a (2) platí:

$$a = \frac{j}{d} \quad (1.3)$$

Při vzniku hřídelového napětí, kdy  $a$  je liché, je frekvence

$$f = a \cdot f_s \quad (1.4)$$

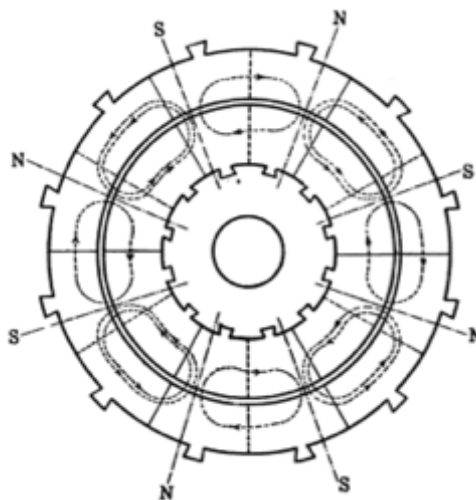
kde  $f_s$  je napájecí frekvence stroje. [5]

Je-li poměr čtyřnásobku segmentů vůči pólům roven celému číslu, pak všechny póly mají stejnou účast na tvorbě kruhového magnetického toku a hřídelového napětí. Není-li výsledek tohoto poměru celé číslo, pak pouze určitá část pólů přispívá ke kruhovému toku, jinak řečeno, čím větší je jmenovatel zlomku, tím nižší je hřídelové napětí. Velikost hřídelového napětí také závisí na velikosti nasycení  $j_h$ . Na obr. 6., jsou znázorněny cesty magnetického toku v motoru, které mají poměr rovnající se 3 ( $4 \times 6/8 = 3$ ), přiléhajících spojů ve jhu, které jsou od sebe vzdáleny  $120^\circ$  elektrických. Algebraický součet toků procházejících třemi po sobě jdoucími spoji je roven nule, za předpokladu sinusového napájení. Pokud by magnetomotorické napětí, procházející každým spojem bylo úměrné toku. Výsledné magnetomotorické napětí by pak představovalo tok, procházející ve směru sousledném a nebo ve směru zpětném, bez vzniku kruhového toku. Je-li magnetomotorické napětí na každém spoji, jeho velikost narůstá v poměru ku toku mnohem rychleji.

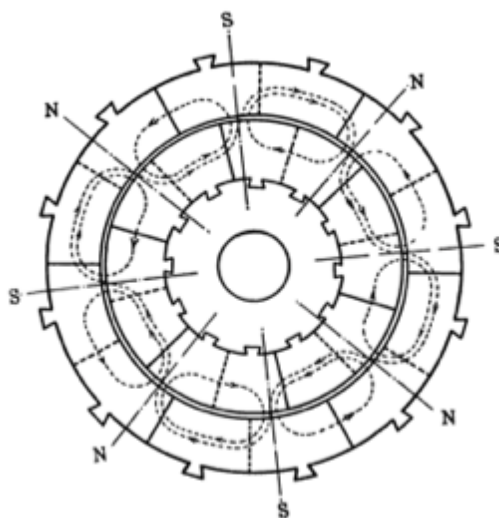
Následně jsou stator i rotor rozebrány zvlášť. Za předpokladu, že stator i rotor jsou seskládány ze segmentů.

*Stator:* Jestliže prochází tok místy s nízkou intenzitou jádra, pak je orientován ve směru chodu hodinových ručiček a vytváří pak spojení čtyř bodů s rozdílnou magnetickou vodivostí. Pokud tok prochází jádrem proti směru chodu hodinových ručiček, pak vytváří spojení osmi bodů s rozdílnou magnetickou vodivostí. Na obr. 7 je tok posunut o  $1/24$  otáčky a nyní převládá tok proti směru chodu hodinových ručiček. Na obr. 9 je rotor posunut o  $1/12$  otáčky, která byla dokončena a poloha je shodná s obr. 6. Proto pro jednu otáčku mezi statorem a hřídelí je potřeba dvanácti cyklů.

*Rotor:* V obr.6. až obr.8. je spojen rotor s převahou toku ve směru hodinových ručiček, tedy sousledné. Není-li za předpokladu ve vzduchové mezeře působení toku ovlivněno nerovnoměrným rozdělením toku ve jhu statoru, pak účinky spojů rotoru nejsou závislé na spojích statoru. Díky skluzové frekvenci rotoru začne v rotoru převládat složka toku jdoucího proti směru chodu hodinových ručiček, tedy zpětná, ovšem po jedné dvanáctině otáčky tok respektuje rotor a sousledná složka toku opět dosáhne svého maxima, tím bude cyklus kolísání hřídelového napětí vlivem segmentů dokončen.

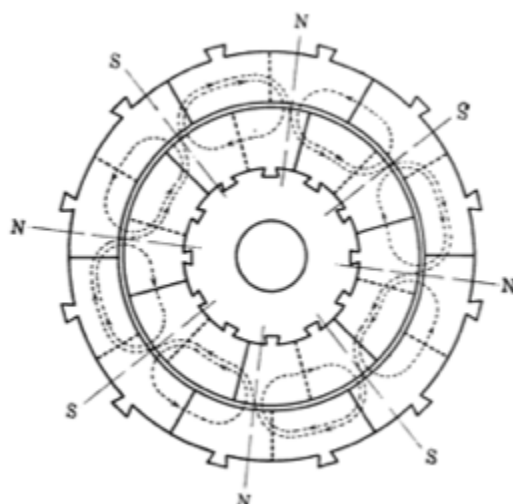


Obr. 6 Vznik hřídelových proudů v osmi pólovém motoru se šesti segmenty [16]



Obr. 7 Hřídelový proud, vytvářený v osmi pólovém motoru se šesti segmenty [16]

Jedná-li se o kroužkový motor v klidu, s odpojeným rotorem, může vznikat hřídelový proud vlivem použití stejného počtu segmentů rotoru i statoru, pak je napětí  $n$ -násobek frekvence, místo toho, aby se skládalo ze dvou napětích o různé frekvenci. Velikost napětí závisí na pozici rotoru, změna velikosti nastane až po otočení rotoru, což odpovídá jedné čtvrtině segmentu. Jakmile začne rotor zrychlovat, hřídelové napětí se rozdělí na dvě frekvenční složky, jejichž frekvence se s nárůstem otáček rotoru začnou výrazně lišit. Hřídelové napětí se pak skládá z velké části  $n$ -násobku síťové frekvence a z malé části  $n$ -násobků skluzové frekvence. [16]



Obr. 8 Vznik hřídelového proudu v osmi pólovém motoru se šesti segmenty [16]

### Nesymetrie druhého druhu

Vložením izolačního materiálu o tloušťce cca  $1\text{ mm}$ , mezi jednotlivé díly statorových segmentů, dojde při sestavování statoru k deformování jednotlivých izolačních vložek a ve výsledku představují velmi tenkou vzduchovou mezeru. Při počítání magnetomotorického napětí je nutné počítat s těmito vytvořenými vzduchovými spárami, které jsou tvořeny z nemagnetického materiálu. [28]

Nesymetrie magnetického obvodu lze tedy shrnout následovně:

Prochází-li magnetický tok skrz magnetický obvod, který se skládá z hřídele, ložisek a kostry stroje, dojde k vyvolání homopolárního napětí v každém ložisku. Vzhledem k otáčející se hřídeli jsou siločáry toku radiální při průchodu z hřídele do ložiska. Napětí indukované v obou ložiscích bude odstraněno, jestliže tok, který prochází ložiskem na jedné straně hřídele bude roven toku, procházejícímu druhým ložiskem, na druhém konci hřídele. Z toho plyne, že hřídelové napětí bude hlavně způsobovat proudy uvnitř ložisek a odizolování ložiskového stojanu od kostry bude bezvýznamné, s výjimkou případů zvyšujících reluktanci toku.

Případy nesymetrie magnetického obvodu:

- dělicí spáry magnetického svazku
- izolované a neizolované stahovací svorníky
- drážky, které zasahují do magnetického obvodu
- magnetická anizotropie materiálu plechů
- odlišná čistá délka magnetického obvodu
- magnetické sycení zubů statoru a rotoru
- excentrické uložení rotoru nebo jeho průhyb
- vějířovitost magnetického obvodu při stříhání plechů

## 1.4 Vliv drážkování statoru a rotoru

Magnetická vodivost vzduchové mezery není vlivem drážkování v prostoru, a ani v čase, konstantní. Následkem nestejného počtu drážek rotoru a statoru je vznik harmonických vyšších řádů magnetického pole. Při otáčení rotoru v magnetickém poli vybuzeném statorovým vinutím uloženým v drážkách statoru, dochází k periodické změně  $\tau_d$  magnetické vodivosti vzduchové mezery. Je také třeba počítat s faktem, že použité elektrotechnické plechy mají jisté magnetické vlastnosti. Magnetický tok, který by se měl ideálně uzavírat skrz zuby, se v jednom z míst může deformovat a uzavírat skrz drážku. Při napájení motorů periodickým napětím ze sítě může být příčinou nesymetrického časového nebo prostorového rozložení magnetického pole použití nevyžehnaných a za studena válcovaných plechů.

Vlastnosti použitých magnetických materiálů:

- ztráty v železe, způsobené:
  - vířivými proudy - závisí na čistotě použitého materiálu, způsobeno vířivými proudy, pro jejich zmenšení se izolují plechy povlakem (lak, oxidy, anorganické sloučeniny křemičitanů),
  - hysterezní - energii potřebnou pro přemagnetování, závisí na ploše hysterezní smyčky. Plocha smyčky závisí na použité technologii válcování a čistotě materiálu
- poměrná permeabilita  $\mu_r$ , která udává kolikrát se zvětší případně zmenší (v případě diamagnetických materiálů). magnetické pole při použití feromagnetického jádra oproti cívce bez jádra. Permeabilita feromagnetických materiálů není stálá, ale závisí na intenzitě magnetického pole
- remanentní indukce se u feromagnetických materiálů pohybuje od 0,5 do 1T
- pro  $p_{1,0}$  by ztráty měly být 1 až 3 W/kg
- pro  $p_{1,5}$  by ztráty měly být 2,5 až 9 W/kg
- zbytková magnetická anizotropie materiálu (izotropní plechy tloušťky  $0,28 \div 0,535$  mm s obsahem křemíku kolem 2,5 %) – krystaly mají v různých krystalografických směrech odlišné vlastnosti. Lze rozlišit snadné a nesnadné přemagnetování vzhledem k osám krystalu.

Jelikož jsou sousední rozteče statoru fázově posunuty, dochází ke změnám indukce, neboť  $\tau_{d1} \neq \tau_{d2}$ . Je-li vinutí statoru, uložené v drážkách a vinutím prochází souměrný sinusový proud, skluz  $s \neq 1$ , dochází ve vzduchové mezeře ke vzniku složitých řádů točivých magnetických polí. Každá tato vyšší harmonická složka magnetomotorického napětí budí své vlastní pole. Na tato pole jsou superponovány zubové magnetické pole, které se otáčí sousledně i protiběžně s prostorovou periodou  $\tau'_{d1}$  a  $\tau''_{d1}$ . Amplitudy tohoto pole se mění s periodou (danou  $\tau_d$ , skluzem a obvodovou rychlostí magnetického pole ve vzduchové mezeře). Tato perioda ovšem závisí na otáčkách rotoru. K podobnému průběhu magnetických polí dochází, při průchodu proudu vinutím rotoru.

Prostorovými drážkovými harmonickými také dochází k menším rozdílům toků, indukované napětí je k vůli nim větší. Jsou tedy nebezpečnější. Při napájení nesinusovým či nesouměrným proudem, jsou řady polí mnohem složitější. Vyšší harmonické složky pole statoru a rotoru spolu navzájem působí, mohou tak vytvářet kladné a záporné točivé momenty. Momenty, které jsou vyvolané vyššími harmonickými složkami, lze rozdělit na:

- 1) asynchronní
- 2) synchronní
- 3) vibrační

K omezení negativních jevů, způsobených drážkováním je, návrh správného počtu drážek rotoru a statoru, vhodným rozměr otevřením, rozložení a natočení drážek.

Doporučení:

1. Křivka magnetomotorického napětí se má blížit co nejvíce sinusovému průběhu. Počet drážek na pól a fázi  $q$  by měl být celé číslo sudé nebo liché.

2. Mezi počtem drážek rotoru  $Q_1$ , rotoru  $Q_2$  a počtem pólů  $2p$  má platit

$$Q_2 \leq 1,25(Q_1 \pm p) \quad (1.4)$$

dojde k omezení asynchronních momentů od zubových polí. Pokud není možné zvolit počet drážek rotoru dělitelný počtem pólů, je třeba kontrolovat rotorové drážkové harmonické řády

$$v = p \pm Q_2 \quad (1.5)$$

nezpůsobí ve stroji hřídelové napětí. V případě že by mělo dojít k výskytu hřídelového napětí, doporučuje se se natočit rotorové drážky přibližně o jednu drážkovou rozteč statoru.

3. Natočení drážek rotoru (statoru) o jednu drážkovou rozteč statoru (rotoru). Prostorová perioda s polem zubových harmonických bude oslabena. Pokud mají použité plechy anizotropní vlastnosti (za studena válcované), je nutné zabezpečit, aby jednotlivé plechy byly vystřihovány a následně skládány se směry válcování každých dvou sousedních plechů ve svazku. Spolu tak svíraly úhel daný následujícím vzorcem.

$$\alpha = \frac{360^\circ}{2} \quad (1.6)$$

4. Nejsou-li drážky natočeny, je třeba splnit následující vztahy

a) pro zmenšení synchronních momentů při stojícím rotoru ( $s = 1$ )

$$\begin{aligned} k_1 Q_1 &\neq k_2 Q_2 \\ Q_2 &\neq 6pk \end{aligned} \quad (1.7)$$

kde  $k_1, k_2 = 1, 2$ ,

$k$  je libovolné celé kladné číslo;

b) pro zmenšení synchronních momentů při otáčení rotoru ( $s \neq 1$ )

$$\begin{aligned} k_2 Q_2 &\neq k_1 Q_1 \pm 2p \\ Q_2 &\neq 6pk \pm 2p \end{aligned} \quad (1.6)$$

kde  $k_1, k_2 = 1, 2$ ,

$k$  je libovolné celé kladné číslo;

+ - motor, alternátor

- - brzda

c) pro zmenšení vibračních radiálních sil

$$\begin{aligned} k_2 Q_2 &\neq k_1 Q_1 \pm 2p \\ Q_2 &\neq 6pk \pm 2p \end{aligned} \quad (1.7)$$

+, - libovolná volba.

Případné konstrukční nesymetrie po obvodě svazku statoru (dělicí spáry mezi segmenty, různé zářezy, otvory, axiálně umístěné kanály atd.) měli by co nejméně narušovat průřez magnetického obvodu. Počet těchto nesymetrií by měl vyhovovat rovnici (1.3). Není-li podmínka splněna, je nutné použít výše popsaná opatření. [4], [5]

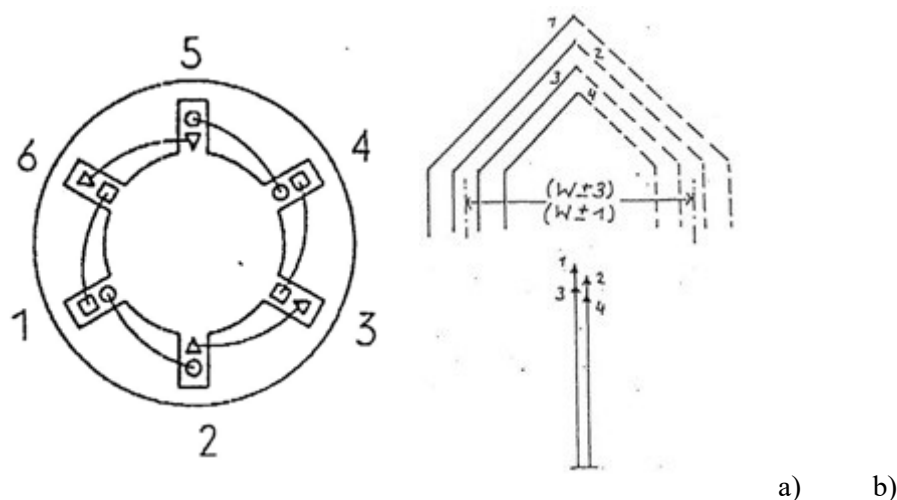
## 1.5 Vliv magnetické nesymetrie dané vinutím

Z principu víme, že vinutí by ve stroji mělo plnit současně dvě funkce:

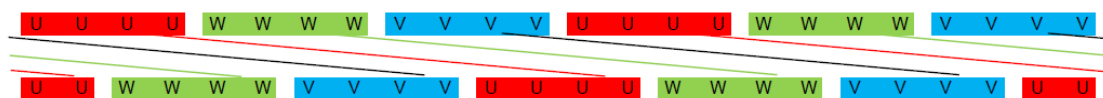
1. Zajistit potřebné elektromotorické napětí.
2. Vytvořit dostatečně velké magnetické pole, nutné pro přeměnu energie.

Pro splnění obou podmínek je možné realizovat jednodušší variantu vinutí jako *jednovrstvé*, složitější varianta je vinutí *dvouvrstvé*. Pro řešení problematiky hřídelového napětí na variantě 1LE5 bylo zkoumáno vinutí *dvouvrstvé*. Počtu cívek vinutí tedy odpovídá i počet drážek statorového svazku.

Jedním z možného způsobu symetrického zapojení vinutí je smyčkové vinutí *K* (hradba) obr. 9. Při tomto zapojení je celková délka čel vinutí oproti následujícím zapojením delší, toto zapojení má ovšem lepší chladiivost rotorového vinutí, větší náchylnost na mechanické namáhání procházejícím proudem (poruchovým, záběrný či brzdovým).



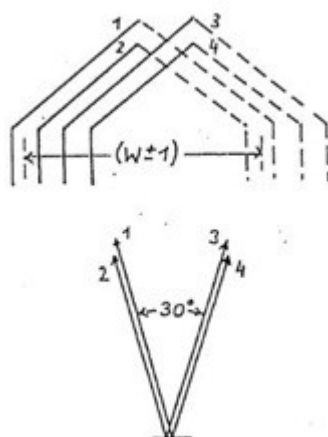
Obr. 9 a) Náčrtek hradbového vinutí *K*, b) rozložení čel a výsledné fázory napětí



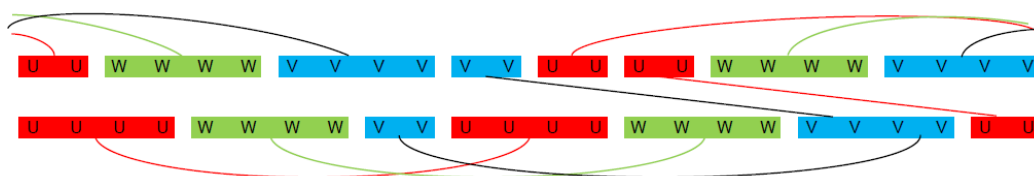
Obr. 10 Náčrtek zapojení hradbového vinutí *K*

Další možností rozložení fázorů napětí je zapojení statorového vinutí jako *KO* – dvouvrstvé vinutí se stejným krokem. Při tomto zapojení se stejným krokem, je počet drážek na pól a fázi *q* identický s předchozím zapojením. Délka čel se ovšem oproti předchozímu zapojení výrazně zkrátí, jednotlivé fázory napětí cívek budou vůči ostatním cívkám cívkové skupiny svírat úhel  $30^\circ$ . Vinutí se může zapojit i jako vinutí se zkráceným krokem.



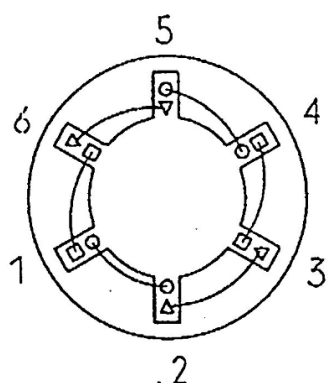


Obr. 11 Náskres vinutí KO se stejným krokem se zapojením

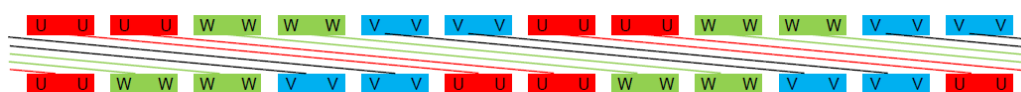


Obr. 12 Náskres zapojení vinutí KO se stejným krokem

Soustředné hradbové vinutí typu K2 s několikanásobnými cívkami uloženými ve dvou vrstvách. Cívka, která se vkládá jako první je vložena do drážek na spodní vrstvu, drážka 2 a 3, postupně je vydrážkován zbytek statoru tak, že ve spodní polovině leží konec předchozí cívky a ve vrchní polovině leží začátek nové cívky, vinutí se vkládá proti směru hodinových ručiček. Cívka, která se vkládá, jako poslední leží v horní polovině drážky, viz obr.13. drážky 1 a 2. Dochází, k nesymetrickému zatěžování jednotlivých fází.

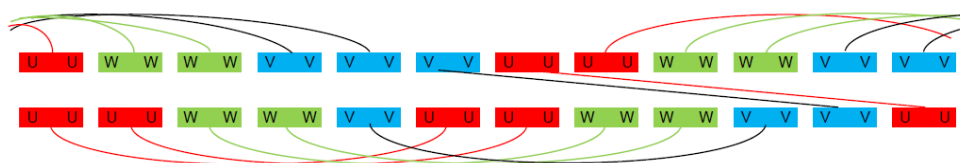


Obr. 13 Náskres a zapojení vinutí K2



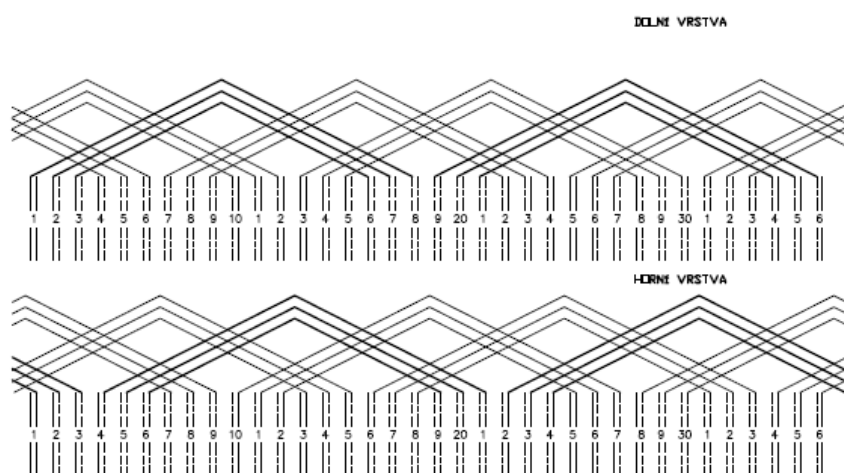
Obr. 14 Zapojení vinutí K2

Vinutí *KO2* spojuje zapojení typu *KO* a zapojení *K2*. Současně jsou navíjeny dvě několikanásobné cívky, vloženy bezprostředně za sebou, navinuty a uzavřeny závěrným drážkovým klínem.

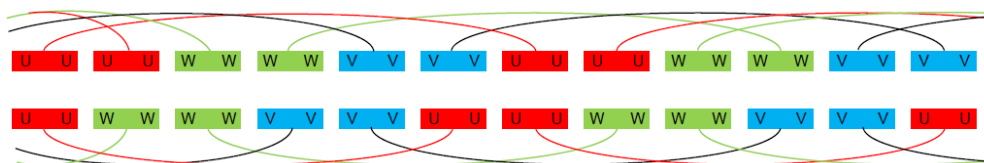


Obr. 15 Zapojení vinutí *KO2*

Vinutí se stejným krokem typu *KK* je seskládáno ze dvou jednovrstvých vinutí, ve spodní vrstvě je uloženo vinutí v protisměru hodinových ručiček, zatímco horní vrstva je uložena ve směru hodinových ručiček. [23]



Obr. 16 Zapojení vinutí *KK*



Obr. 17 Zapojení vinutí *KK*

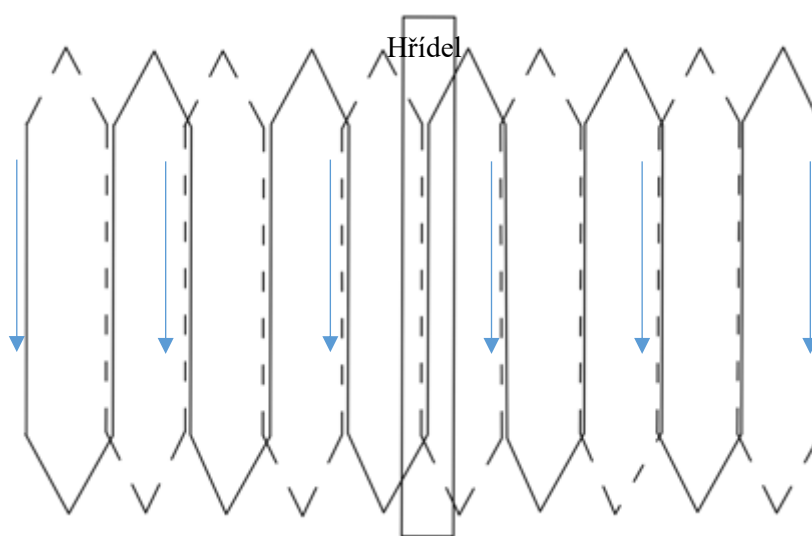
Fázorovým součtem jednotlivých napěťových složek ve vinutí dostaneme hvězdicí fázorů. Zkrátíme-li krok vinutí, tedy  $\tau_p - y$ , a to v poměru  $c/mq$ , můžeme tak z části odstranit vliv násobků základní harmonické složky z indukovaného napětí, a to zejména 5. a 7. Výsledný fázor napětí v jednotlivých cívkách nebude dosahovat stejné velikosti jako u vinutí s nezkráceným krokem, dá se tak říci, že nebude tak velké zkreslení lichými násobky základní frekvence.

### Asymetrie rotorové klece v asynchronních strojích

Porušení jedné z rotorových tyčí u motoru s kotvou nakrátko ať už při výrobním procesu nebo při provozování stroje, vede k nadměrnému zatěžování okolních tyčí proudem a dalších poruch. V případě přerušení rotorové tyče dojde k výskytu asymetrického toku v magnetickém obvodu. Dojde-li k prasknutí tyče například mezi spojovacím kruhem a tyčí, narušená tyč se

průchodem proudu začne přehřívat, což může způsobit úplné přerušení tyče. Tím je mírně narušena symetrie klece a vedlejší tyče mohou být více namáhané jak tepelně, tak mechanicky.

Přerušení jedné rotorové tyče by nemělo být výrazným ohrožením pro stroj. Je-li motor navržen na určitý druh provozu, je potřeba omezit těžké a především dlouho trvající rozběhy, dochází tím k nadměrnému ohřívání jak rotorových tyčí, tak i rotorového svazku. Je třeba vzít v úvahu, že při startu je záběrný proud vyšší než jmenovitý, jehož měnící se amplituda jde ruku v ruce s měnícími se silovými účinky proudu. Poškozením rotoru a vznikem asymetrie dojde k produkci pulzujících momentů, které vytváří elektromagnetický moment. Pulzující momenty jsou superponované na střední hodnotu hlavního momentu, amplitudy jsou velmi malé, ale i tak dochází k nežádoucímu hluku a vibracím.



Obr. 18 Příčinou hřídelového toku může být dvouvrstvé vlnové vinutí

Pokud z výše popsaných důvodů prochází magnetický tok skrz magnetický obvod, který se skládá z hřídele, ložisek a kostry stroje. Dojde k vyvolání homopolárního napětí v každém ložisku, vzhledem k otáčející se hřídeli jsou siločáry toku radiální, prochází hřídeli do ložiska. Napětí indukované v obou ložiscích bude odstraněno, jestliže tok, který prochází ložiskem na jedné straně hřídele bude roven toku, procházejícímu druhým ložiskem, na druhém konci hřídele. Ať je hřídelový tok stejnosměrný nebo střídavý, homopolární napětí bude stále indukováno v hřídeli na stejné frekvenci jako tok. Hřídelové toky se objeví pouze jako výsledek proudu spojujícího hřídel. A to pouze v případech, že je použita nesymetrická konstrukce vinutí, také u rotoru nakrátko: je-li klec rozdělena na části, přerušené rotorové tyče, nerovnoměrné vzduchové mezery nebo vlnové vinutí s jednou tyčí na drážku, tento problém se týká střídavých strojů. U stejnosměrných strojů, je pravděpodobný výskyt, díky velkému hřídelovému toku. Nerovnost proudů procházejících dvouvrstevným vinutím z obr. 18., způsobí nárůst hřídelového toku. Tento jev je patrný například u velkého asynchronního motoru s vinutím na rotoru. Bylo experimentálně ověřeno, je-li obvod jedné fáze tvořen otevřeným vlnovým vinutím, při provozu motoru za různých výchozích a provozních podmínek. [13], [16], [17]

## 2 Rozbor používaných diagnostických metod

### 2.1 Metody výpočtní

Pro posouzení provozuschopnosti stroj je důležitá nejen velikost hřídelového napětí, ale i jeho frekvence. Od velikosti hřídelového napětí se dále odvíjí i proud, který se uzavírá přes ložiska. K výpočtu velikosti hřídelového napětí je zapotřebí znát kruhový magnetický tok, jemuž je hřídelové napětí přímo úměrné a je rozdílem dvou magnetických toků, opačného směru v nasyceném magnetickém obvodu s nelineární charakteristikou. Tento magnetický tok se určí ze změny celkového magnetického toku, ve jhu  $\Phi_j$ , který je způsoben případnou kombinací nesymetrií magnetického obvodu a za předpokladu sinusového průběhu:

$$\Phi_{ju} = \frac{1}{2}(\Phi_{jmax} - \Phi_{jmin}) \text{ [T]} \quad (2.1)$$

Jako první je potřeba určit, jakou nesymetrií je daná harmonická složka hřídelového napětí způsobena, dále je potřeba provést výpočet magnetických toků  $\Phi_{jmax}$  a  $\Phi_{jmin}$  při minimálním odporu a maximálním odporu magnetického obvodu, následně vypočítat hodnotu  $\Phi_{ju}$  a efektivní hodnotu  $u$ -té harmonické složky hřídelového napětí:

$$U_{hu} = \frac{\omega_u}{\sqrt{2}} \cdot \Phi_{ju} \text{ [V]} \quad (2.2)$$

Autor [5] uvádí, že vzniku ložiskových proudů je zapotřebí, aby maximální hodnota hřídelového napětí byla v rozmezí 200 až 500 mV, dáno použitým mazacím filmem a druhem ložiska.

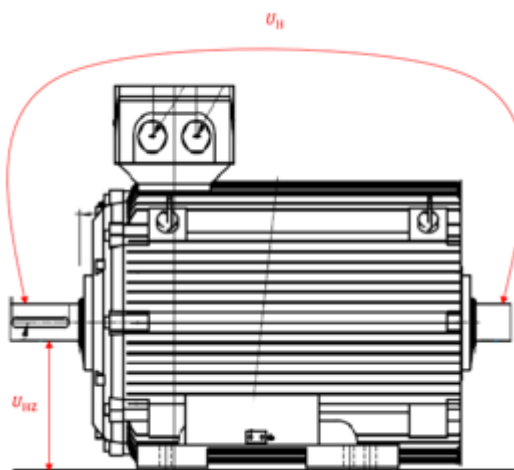
$$I_{lu} = \frac{U_{hu}}{\sqrt{R^2 + \omega_u^2 \left( L^2 + \frac{\mu_0 S_{j1}}{\epsilon N_s} \right)}} \text{ [V]} \quad (2.3)$$

Ložiskový proud této velikosti bude dosahovat každou půlperiodu. Jakmile napětí klesne pod hodnotu průrazného napětí, bude proudový okruh přerušen, dojde ke vzniku vysokofrekvenčních aperiodických kmitů a proud klesne k nule.

### 2.2 Metody měření

Dle normy IEC 60034-17, by hřídelové napětí nemělo přesahovat 500 mV špičkové hodnoty. Zatím není standardní vybavení a metody pro měření tohoto napětí. Díky metodě, která vytváří nízko impedanční cestu skrz hřídel nemusí být vždy naměřena skutečná hodnota hřídelového proudu. Nainstalováním Rogowskiho cívek je široce využíváno v měření zemních proudů s velkými změnami  $dU/dt$  na strojích, které jsou napájeny ze statických měničů frekvence.

Měření samotného hřídelového napětí  $U_H$  jak je na obr.16., tak i napětí mezi hřídelí a potenciálovou zemí  $U_{HZ}$ . Tato napětí je možné měřit jak voltmetrem, tak za pomoci osciloskopu s následnou FFT analýzou. Zajímá nás jak velikost samotného hřídelového napětí tak můžeme zjistit i další poruchy stroje. Impedanční vlastnosti měřících sond je nutné přizpůsobit impedanci měřeného obvodu. Pro měření je vhodné měřící přístroj galvanicky oddělit, kvůli zavedení potenciálu a nebo použít diferenciální měření s plovoucí potenciálovou nulou. Další způsoby zapojení měření jsou v kapitole 2.8.



Obr. 19 Měření hřídelového napětí

### 2.3 FFT analýza

Měřený signál lze dále zpracovat pomocí FFT, měřený signál musí splňovat Dirichletovy podmínky, kde:

- $f(t)$  je periodická funkce
- Uvnitř zadaného intervalu (jedné periody) musí být  $f(t)$  alespoň po částech spojitá, t.j. může mít konečný počet bodů nespojitosti prvního druhu.
- Uvnitř daného intervalu musí mít funkce konečný počet extrémů.
- Funkce musí být definována v krajních bodech intervalu (t.j. musí v nich nabývat konečných hodnot).

Pro měření elektrických veličin je nejznámější rozklad na soubor harmonických funkcí, ty se liší amplitudou, úhlovou frekvencí a počáteční fází. Pokud je signál vyjádřen v závislosti na frekvenci, jedná se o tzv. frekvenční oblast. Pro funkce, které jsou neperiodické se používá Fourierova transformace.

Vzorce, definující přímou a zpětnou Fourierovu transformaci pro signál:

$$X(\omega) = F\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (2.4)$$

$$x(t) = F^{-1}\{X(\omega)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega \quad (2.5)$$

Pro diskrétní signály lze pomocí definovat transformaci, s určitým algoritmem. Tento algoritmus je nazýván Fast Fourier Transform (Rychlá Fourierova Transformace)

#### *Měření a následné zpracování měřené veličiny*

Pokud měřený signál, v tomto případě napětí není spojitý, viz. výše, je nutné získat funkci, která se bude vzorkovat – funkce vzorkovací. Je to výběr určitých bodů v měřeném signálu ve vzorkovacím čase. Tento čas lze definovat, jako

$$t = k \cdot \Delta t \quad (2.6)$$

$$x_k = x(k \cdot \Delta t) \quad (2.7)$$

kde  $k \in \langle 0; \infty \rangle$

$\Delta t$  odpovídá vzorkovací frekvence  $f_{vz}$

$$f_{vz} = \frac{1}{\Delta t} [\text{Hz}] \quad (2.8)$$

Vzorkovací frekvence a citlivosti jednotlivých měřících prvků mají zásadní vliv na kvalitu měření. Frekvence vzorkování je omezen pro kvalitu záznamu Nyquistovou frekvencí. Je to  $f_{vz}/2$ . Po překročení této frekvence hrozí chyba při vzorkování a následné zkreslení vzorkovaného signálu. Tento jev se nazývá aliasing. Pro vyloučení tohoto jevu se volí A/D převodníky rozsah měřeného signálu. Kvantový šum vzniká u A/D převodníku s nízkou rozlišovací schopností tzn. menší počet vzorků.

Rozlišovací schopnost spektrální analýzy, je dána převrácenou hodnotou doby záznamu  $t_z$ . maximální frekvence analýzy  $f_m$  je rovna polovině vzorkovacího kmitočtu. Signály pro diagnostiku jsou zpravidla charakteristické přítomností izolovaných harmonických složek ve svém spektru. Frekvence složek nemusí být jen celočíselným násobkem  $\Delta f$ , což může být zdrojem chyb v analýze.

$$\Delta f = \frac{1}{t_z} [\text{Hz}] \quad (2.9)$$

$$f_m = \frac{f_{vz}}{2} [\text{Hz}] \quad (2.10)$$

Pokud je frekvence harmonického signálu rovna celočíselnému násobku  $\Delta f$  ve spektru původně harmonického signálu o frekvenci  $f_0$ , která není celočíselným násobkem  $\Delta f$ , vznikne mnoho dalších složek o vysoké amplitudě. Frekvenční složky, které jsou nejbližší skutečné frekvenci  $f_0$ , mají amplitudu podstatně odlišnou od amplitudy výchozího signálu. [32]

## 2.4 Monitorování stavu

U hřídelových napětí a proudů nemůže být diagnostika zanedbávána. V běžném provozu pro zachování minimálního hřídelového napětí jsou používána izolovaná ložiska v kombinaci s uzemněním hřídele. Od velikosti hřídele se odvíjí počet uzemňovacích kartáčů. Výběr pozice kartáčů je volen s ohledem na možný výskyt zemních smyček. Jeden zemnicí kartáč je často umístěn mezi motorem a poháněným zařízením ke zvýšení eliminace elektrostatického vybíjení na hřídeli. Pomocí online diagnostiky je signál převeden FFT analýzou. Sondy, které se používají pro snímání signálů obsahují izolované kartáče. Počet sond, které je potřeba použít, závisí na počtu hřídelemi a elektricky izolovaných prvků pohonu. V mnoha případech je proud snímáný kartáčem přes bočník s velmi nízkou impedancí ( $100 \cdot 10^{-3} \Omega$ ) a nebo přes oddělovací širokopásmovou Hallovu sondu. Na měřicí kartáče je připojen osciloskop.

Pro diagnostiku rotorové excentricity mohou být použity tyto signály:

- fázové napětí
- fázový proud
- hřídelové napětí

## Metody

### A. Impedanční spektrum

Převod fázových hodnot na fázory

$$u_s = \sqrt{\frac{2}{3}((u_a - u_0)^2 + (u_b - u_0)^2 + (u_c - u_0)^2)} \text{ [V]} \quad (2.11)$$

$$i_s = \sqrt{\frac{2}{3}((i_a - i_0)^2 + (i_b - i_0)^2 + (i_c - i_0)^2)} \text{ [A]} \quad (2.12)$$

kde  $u_a, u_b, u_c$  - fázové hodnoty napětí  
 $i_a, i_b, i_c$  - fázové hodnoty proudů  
 $u_0, i_0$  - nulové složky napětí a proudu

$$u_0 = \frac{1}{3}(u_a + u_b + u_c) \text{ [V]} \quad (2.13)$$

$$i_0 = \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c) \text{ [A]} \quad (2.14)$$

Modul impedance,

$$z = \frac{u_s}{i_s} \text{ [\Omega]} \quad (2.15)$$

Impedanční spektrum je použito pro rychlou Fourierovu transformaci (FFT). Při průběhu analýzy bylo zjištěno, že pole frekvenčních harmonických je ovlivněno excentricitou rotoru. Frekvence harmonické je definována, jako:

$$f_\varepsilon = \frac{f}{p} \text{ [Hz]} \quad (2.16)$$

Excentricita je vyjádřena jako:

$$\varepsilon = \frac{\delta_{max} - \delta_0}{\delta_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (2.17)$$

### B. Hřídelové napětí

Hřídelové napětí, bylo také použito pro rychlou Fourierovu transformaci. Hlavní harmonická složka je složka drážkové harmonické s frekvencí:

$$f_{dr} = \frac{Q}{p} f \text{ [Hz]} \quad (2.18)$$

Drážková harmonická složka je také ovlivněná rotorovou excentricitou. Zatímco drážková harmonická složka je hlavní harmonická s efektivní hodnotou, která je použitelná pro diagnostiku rotorové excentricity

$$V = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n u_i^2}{n}} \quad (2.19)$$

kde  $i$  - je  $i$ -té měření  
 $n$  - je počet všech měření  
 $u$  - je okamžitá hodnota napětí [V]

S narůstající excentricitou rotoru narůstá i efektivní hodnota hřídelového napětí.[20]

## 2.5 Vibrodiagnostika

Nedílnou součástí všech rotačních strojů jsou ložiska zajišťující plynulé otáčení hřídele. Příčiny vzniku hřídelového napětí popsané v předchozí části této práce mohou a mívají pro ložiska fatální následky. Překročí-li hřídelové napětí určitou hodnotu, pak ložisky prochází ložiskový proud. Velikost průrazného napětí mazacího filmu závisí na mnoho aspektech použitých ložisek. Při průchodu proudu skrz ložisko dochází k namáhání styčné plochy ložiska a valivého elementu u valivých ložisek, mohou vznikat mikroskopické částčky materiálu styčných ploch, únavové trhliny. Nebo také při neperiodickém namáhání ložiska proudem o velké proudové hustotě dochází k natavování vrstvičky styčné plochy její vytrhnutí, následnému rozstříku do okolí a ke zchlazení. Takto poškozený povrch následně je zdrojem rezonancí, a to v celém tělese ložiska. Tyto vibrace jsou následně detekovatelné.

Pro správnou diagnostiku je nutné zvolit vhodnou metodu snímání vibrací buď dotykově a nebo bezdotykově. Lze rozlišit kmity relativní a kmity absolutní.

- Absolutní kmitání – vztahuje se vůči gravitačnímu poli země, jako fixní bod.
- Relativní kmitání – vztahuje se vůči určitému bodu

Výchylka kmitů bývá detekována pomocí senzorů pracujících na principu indukčním, kapacitním magnetickém a nebo optickém. Akcelerometry jsou používány pro měření rychlosti. Naměřená data lze následně analyzovat jak ve frekvenční, tak v časové oblasti. Vhodným zpracováním signálu je použití FFT. [12]

## 2.6 Frekvenční analýza proudu a rozptylového magnetického pole

U každého asynchronního stroje může během provozu docházet k jisté elektrické nebo magnetické nesymetrii, ať už je to způsobeno konstrukcí a nebo provozováním. Důsledkem těchto nesymetrií mohou být ve vzduchové mezeře přídavná rušivá magnetická pole. Dochází k vyvolání parazitního momentu, který působí proti směru otáčení motoru. V rozptylovém magnetickém poli v okolí stroje a statorovém proudu se vyskytují přídavné frekvenční složky v okolí první harmonické a otáčkových frekvencí. Tuto on-line diagnostiku lze realizovat s použitím měřícího transformátoru proudu. Pro diagnostikování rozptylového magnetického pole pomocí snímací cívky vhodné velikosti, přiložením na kostru stroje. Z popsaných analýz, naměřených otáček lze spočítat frekvence postranních pásem. [12]

$$f_d = f_1 - 2f_1 \cdot s \quad [\text{Hz}], \quad (2.20)$$

$$f_h = f_1 - 2f_1 \cdot s \quad [\text{Hz}], \quad (2.21)$$

$$s = (n_s - n) / n_s \quad [-]. \quad (2.22)$$

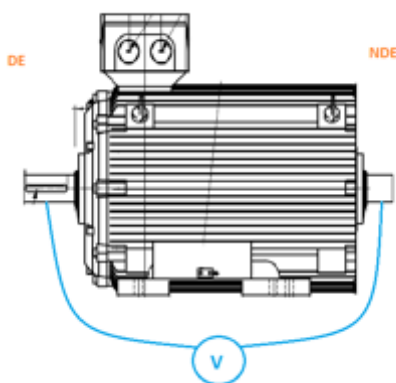
## 2.7 Tribodiagnostika

Diagnostika, zabývající se analyzováním používaného oleje a zjištění stavu třecích ploch. Opotřebením stykových ploch lze rozdělit na adhezivní, erozivní, kavitační, únavové a vibrační. Tato diagnostická metoda je vhodná především u strojů, které využívají oběhu maziva. Při chodu stroje dochází k ořezu, tím vznikají ořezové částice. Lze analyzovat jejich množství, velikost a jejich chemické složení. Pro analyzování oleje je vhodná atomová spektrometrie. [12]

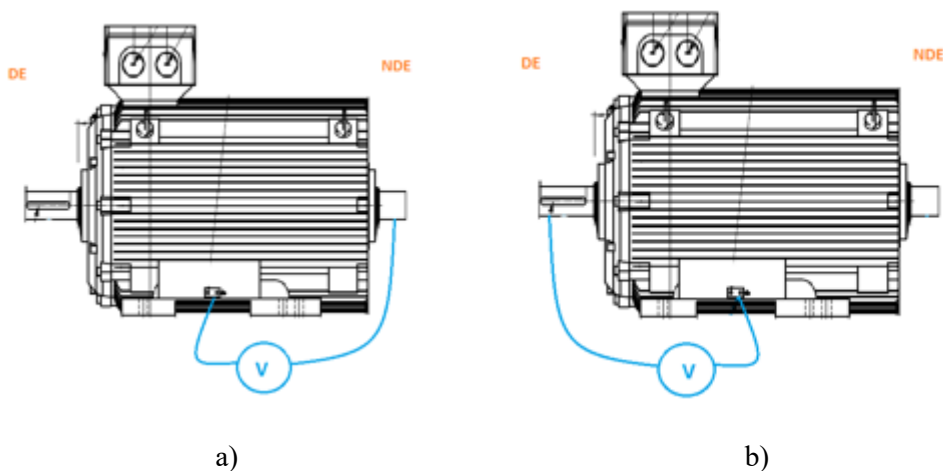


## 2.8 Zapojení jednotlivých měření

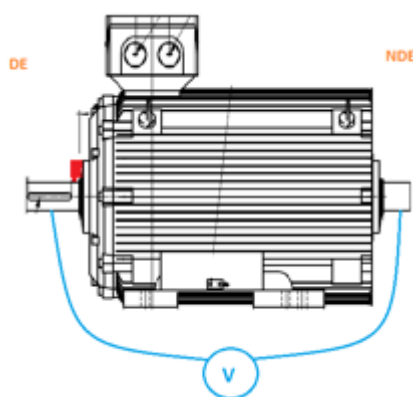
Zapojení měřícího přístroje bylo provedeno dle schématu na obr.20. až obr.26., kde měřícím přístrojem byl v mém případě osciloskop Fluke 199C s dvěma měřicími sondami. Jedna ze sond byla umístěna na *DE* (Drive End) konec hřídele, která bývá propojena s pohonem. Druhá ze sond byla umístěna na *NDE* (Non Drive End), konec hřídele s umístěným ventilátorem. Pro měření hřídelového napětí *hřídel – hřídel* byly měřící sondy umístěny do měřícího přípravku, který zajišťoval potřebný přítlak sond na hřídeli po dobu měření. Dále byly měřeny proudy pomocí dvou klešťových ampérmetrů Chauvin Arnoux RMS CLAMP MULTIMETER F15 a Metra Blansko PK310.



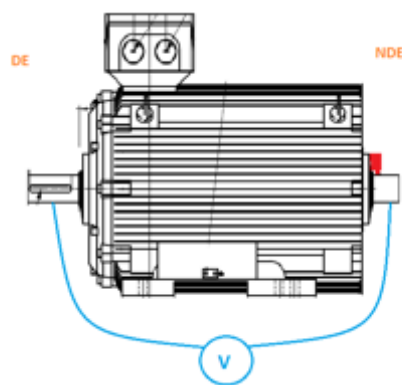
Obr. 20 Měření *hřídel – hřídel*



Obr. 21 Měření a) *NDE – hřídel*, b) *DE – hřídel*

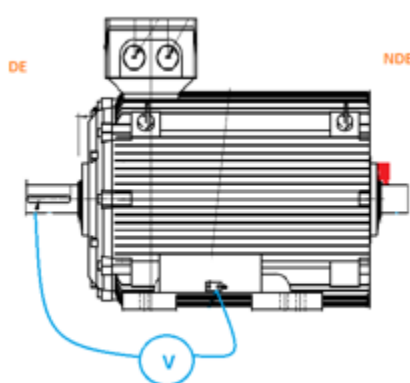


a)

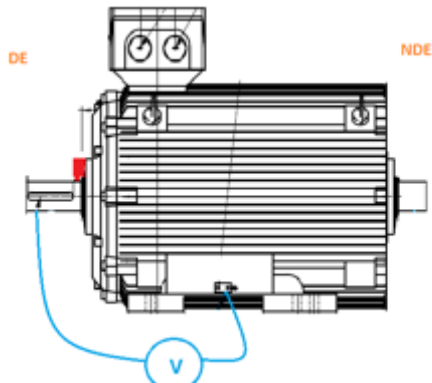


b)

Obr. 22 Měření *hřidel* – *hřidel* s kartáči a) NDE; b) DE

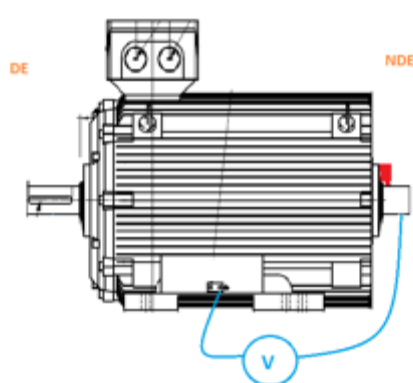


a)

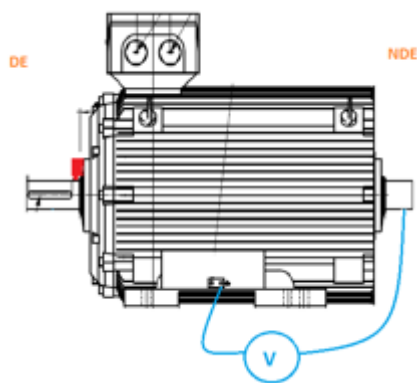


b)

Obr. 23 Měření *DE strana* – *kostra* stroje s kartáči a) NDE; b) DE

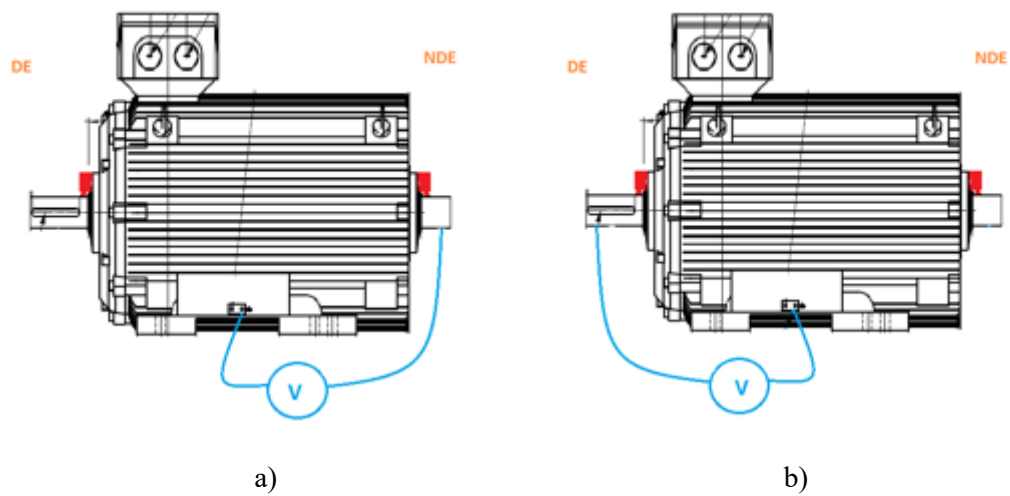


a)

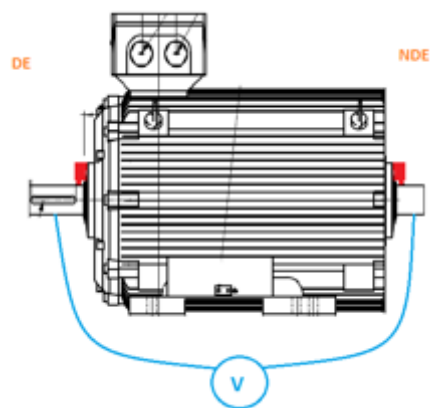


b)

Obr. 24 Měření *NDE strana* – *kostra* stroje s kartáči a) NDE; b) DE



Obr. 25 Měření s kartáči na *NDE* i *DE*; *NDE* – *kostra*; b) *DE* - *kostra*



Obr. 26 Měření *hřídel* – *hřídel* s kartáči na *NDE* i *DE*

### 3 Měření na různých typech asynchronních motorů

#### 3.1 Vliv magnetické nesymetrie na hřídelové napětí motoru

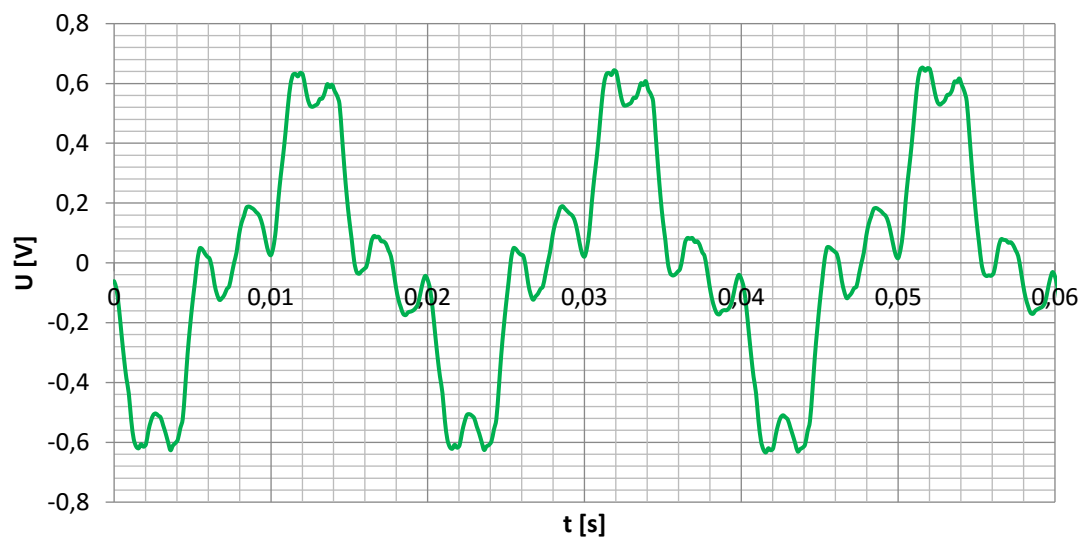
Tab. 1. Základní popis měřených motorů

Verze:	1LE1504-3AB7	1LE5504-3AB73-4AB0
Číslo typové zkoušky:	31043-A	31043-A-D
Specifikace:	18950300	18950300
Jmenovitý výkon:	315 kW	315 kW
Jmenovití napětí:	400 V	400 V
Jmenovitý proud:	560 A	560 A
Zapojení vinutí:	D	D
Účinník:	0,831	0,831
Účinnost:	96,71%	96,71%
Jmenovité otáčky:	1490 min <sup>-1</sup>	1490 min <sup>-1</sup>
Počet drážek statoru:	48	48
Počet drážek rotoru:	40	40
Účinnostní třída	IE4	IE4
Délka rotorového svazku:	625 mm	618 mm

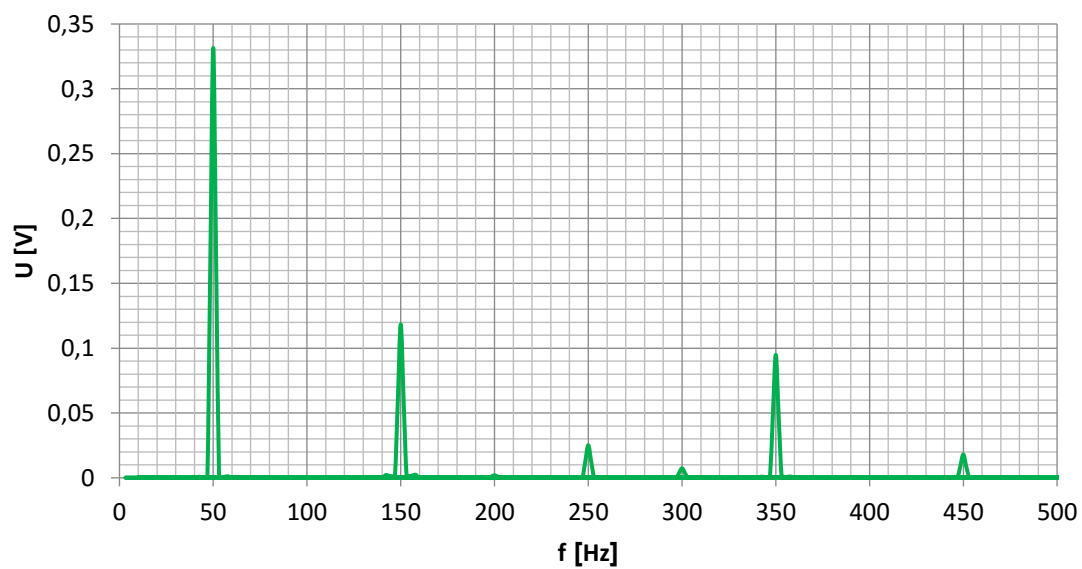
- Motor byl napájen z rotačního zdroje, pro zajištění čistě sinusového průběhu
- Všechna měření byla prováděna se sondami umístěnými *hřídel – hřídel*
- Měření bylo prováděno pro síťový kmitočet 50Hz

### 3.1.1 Měření motoru 1LE5504-3AB7 – délka rotoru 625 mm

#### a) Stav naprázdno

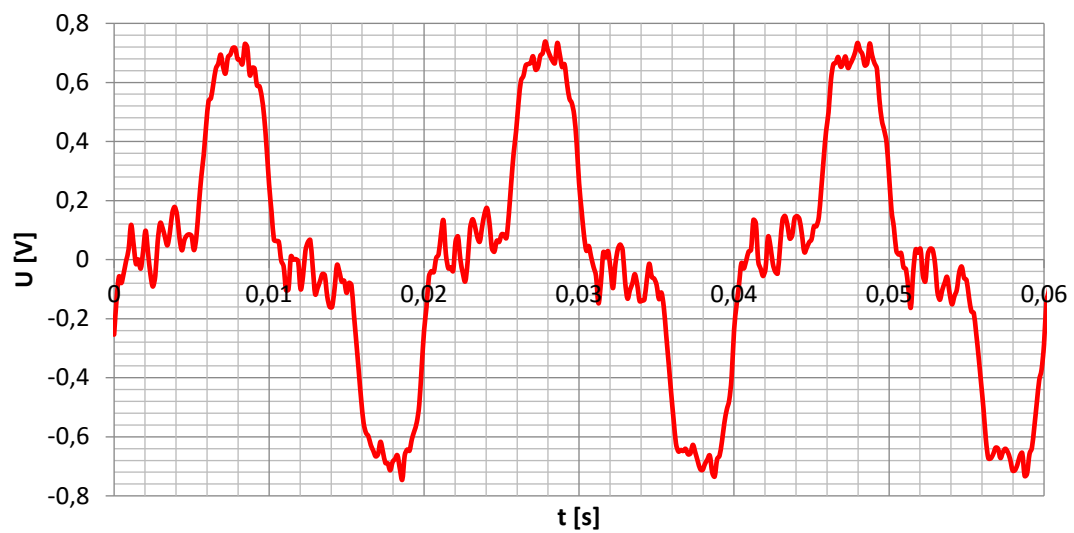


Obr. 27 Průběh hřídelového napětí při 400V

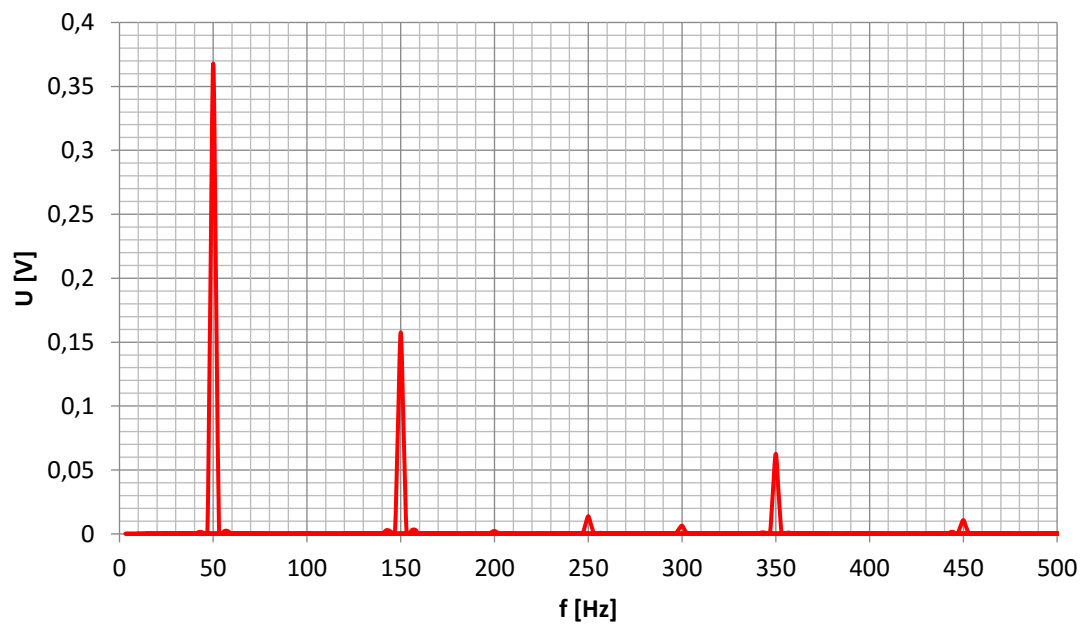


Obr. 28 Frekvenční spektrum hřídelového napětí při 400V

**b) Jmenovité zatížení**

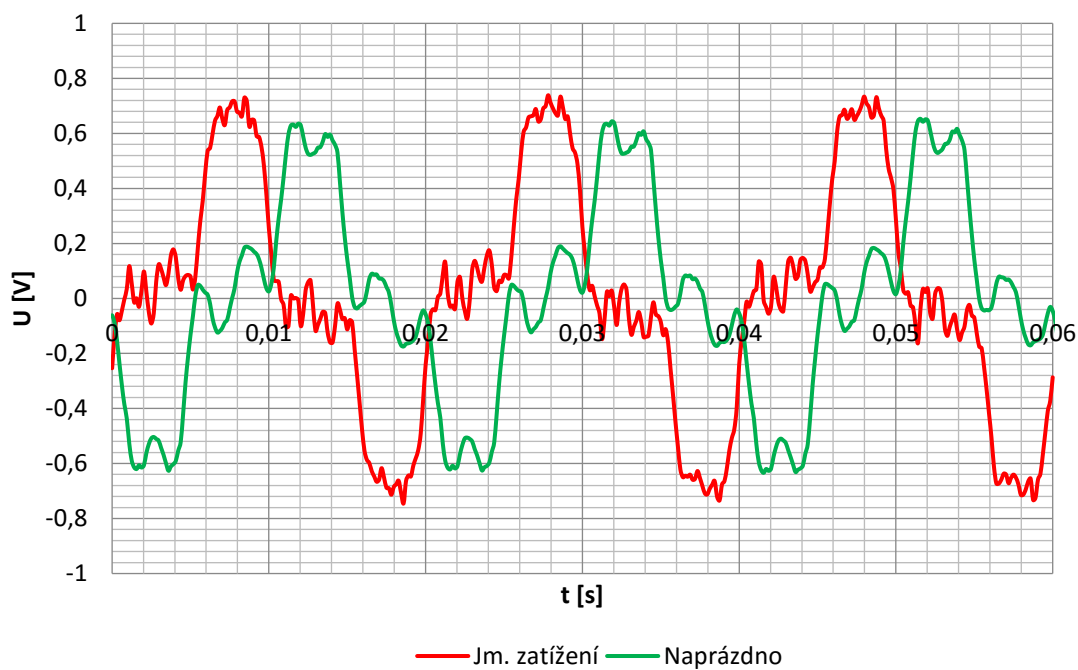


Obr. 29 Průběh hřídelového napětí při 400V

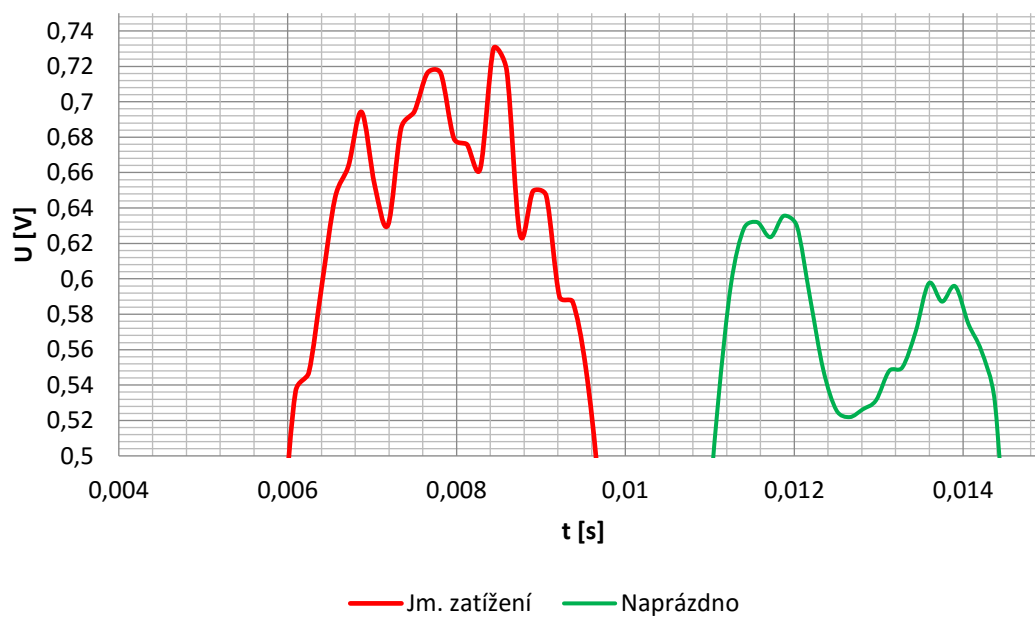


Obr. 30 Frekvenční spektrum (hřídel – hřídel), při 400V

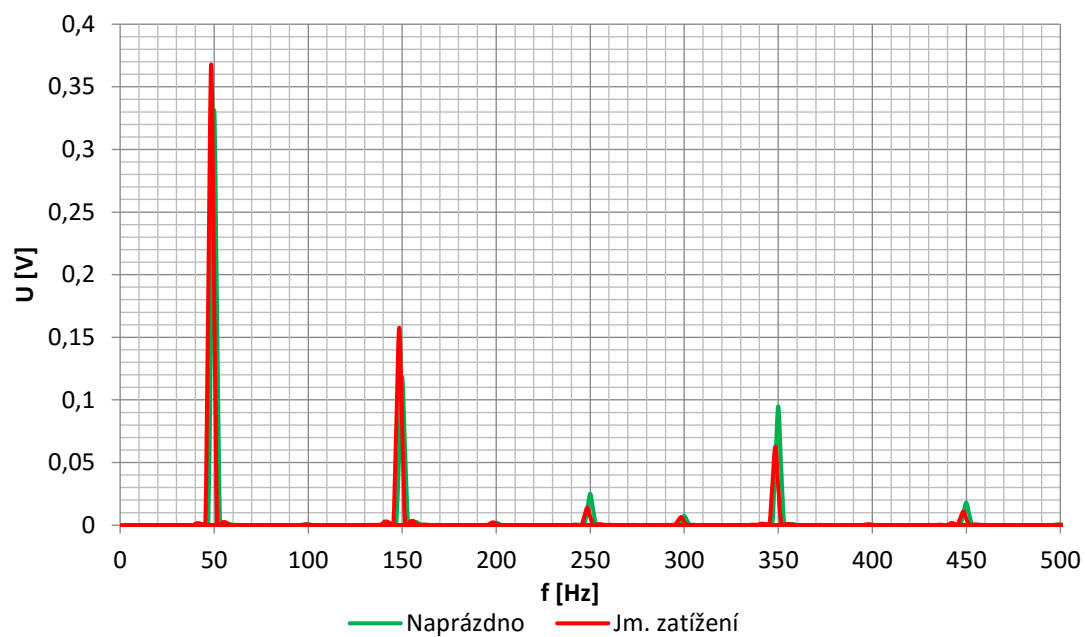
c) Porovnání průběhů naprázdno a při jmenovitém zatížení



Obr. 31 Průběh napětí na hřídeli (hřídel – hřídel) – porovnání

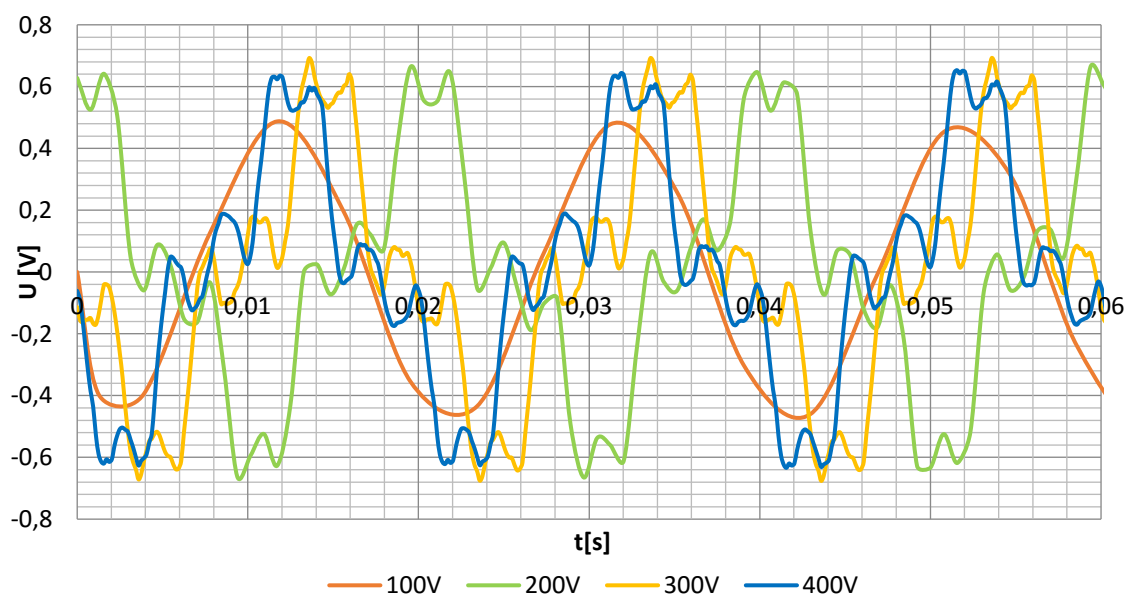


Obr. 32 Průběh napětí na hřídeli (hřídel – hřídel) – detail



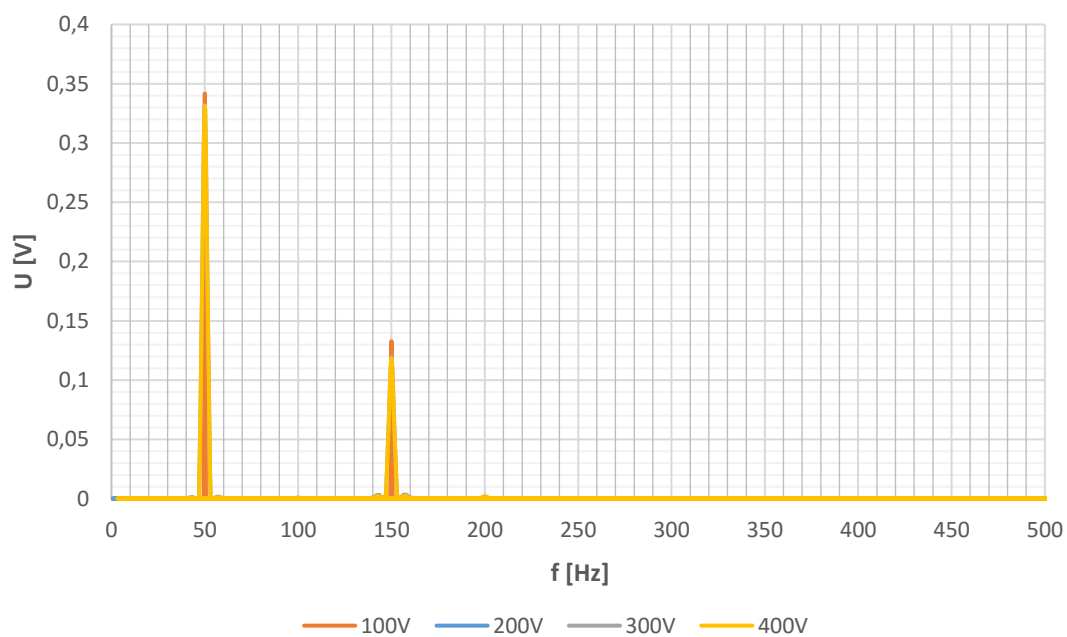
Obr. 33 Frekvenční spektrum – porovnání

**d) Vliv svorkového napětí na hřídelové napětí – naprázdno**



Obr. 34 Srovnání jednotlivých hřídelových napětí

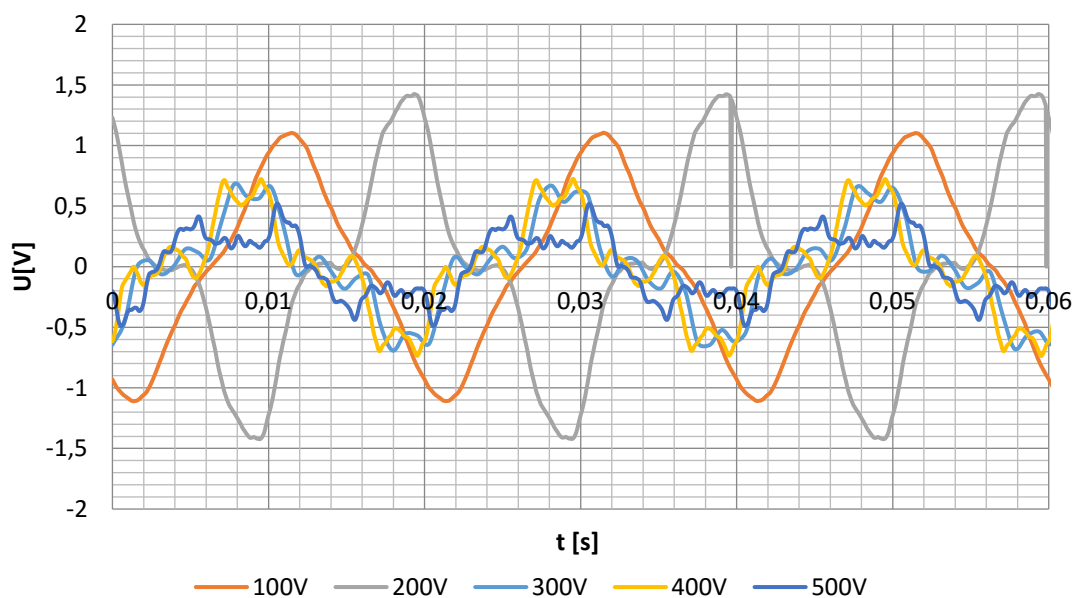




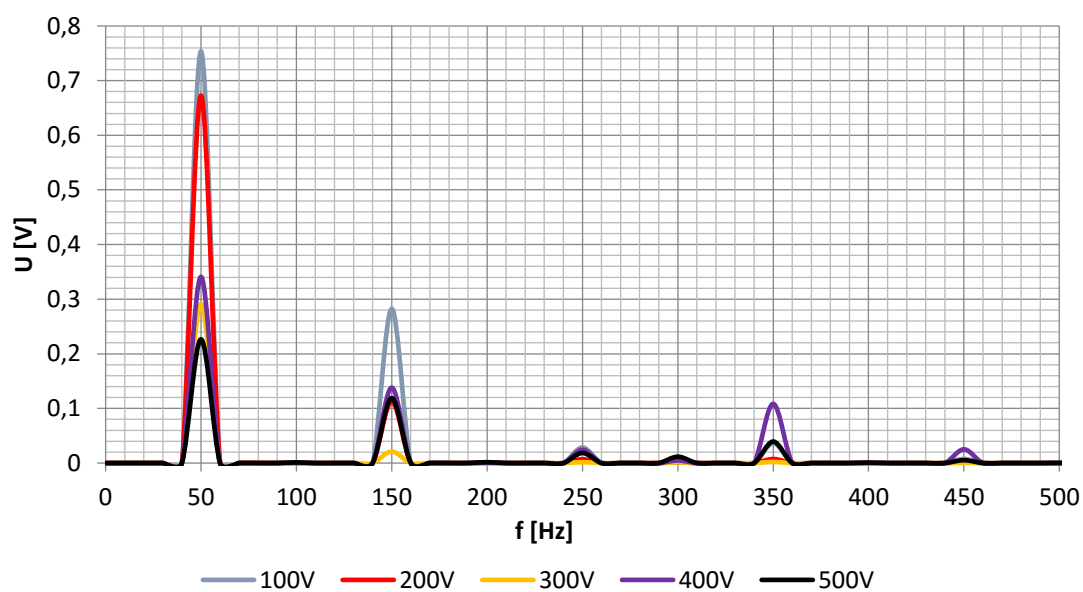
Obr. 35 Porovnání frekvenčních spekter pro jednotlivá napájecí napětí

### 3.1.2 Měření motoru 1LE5504-3AB7 – délka rotoru 618 mm

#### a) Vliv svorkového napětí na hřídelové napětí

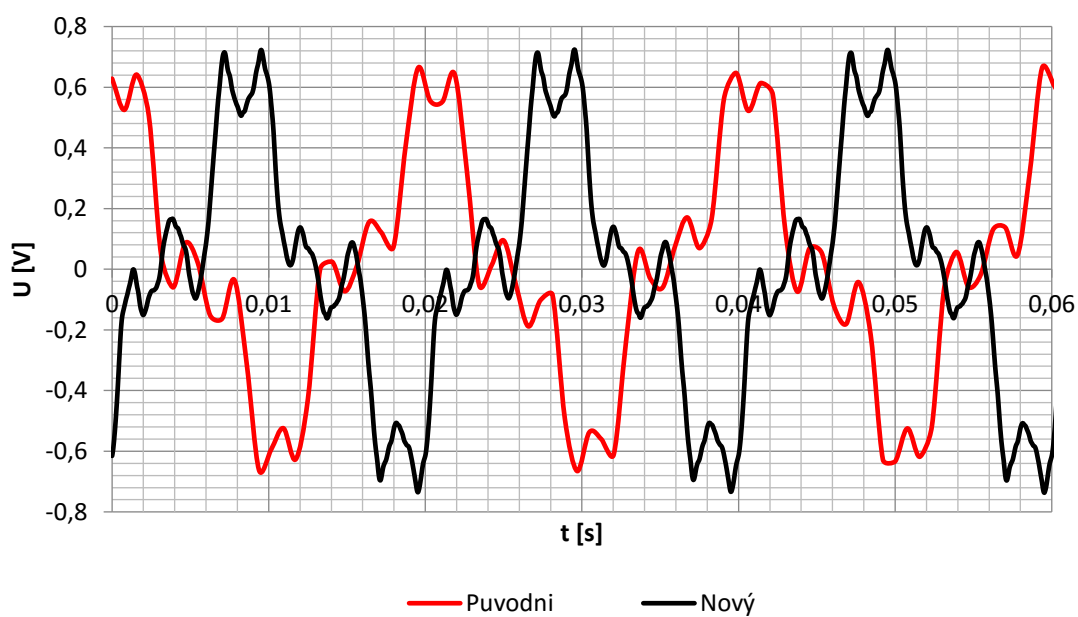


Obr. 36 Srovnání jednotlivých hřídelových napětí

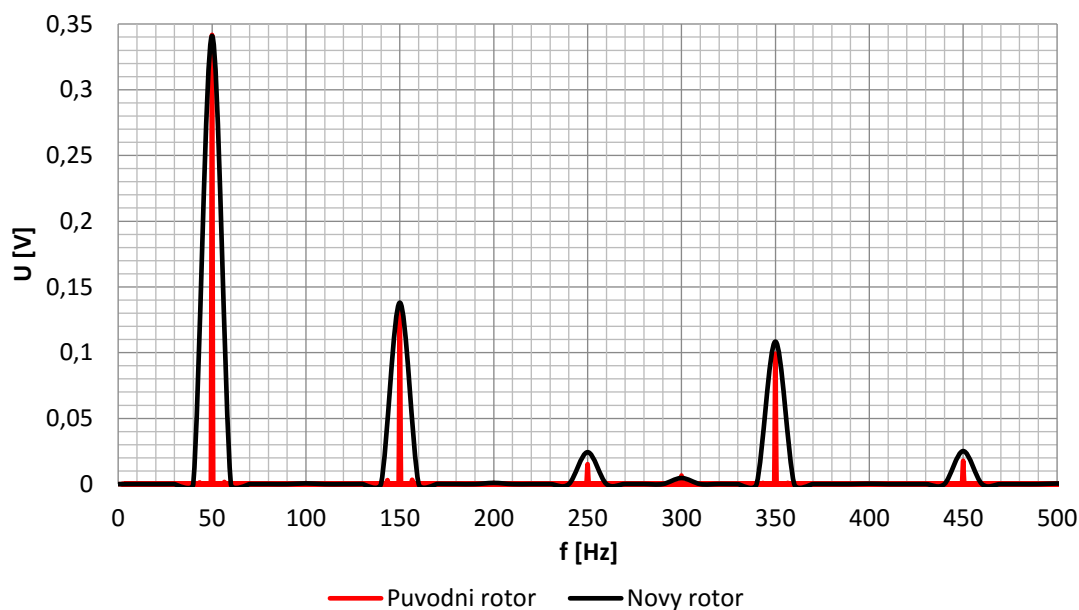


Obr. 37 Porovnání frekvenčních spekter pro jednotlivá hřídelová napětí

**b) Porovnávací měření pro pracovní bod 400V**



Obr. 38 Průběh hřídelového napětí, před a po výměně rotoru



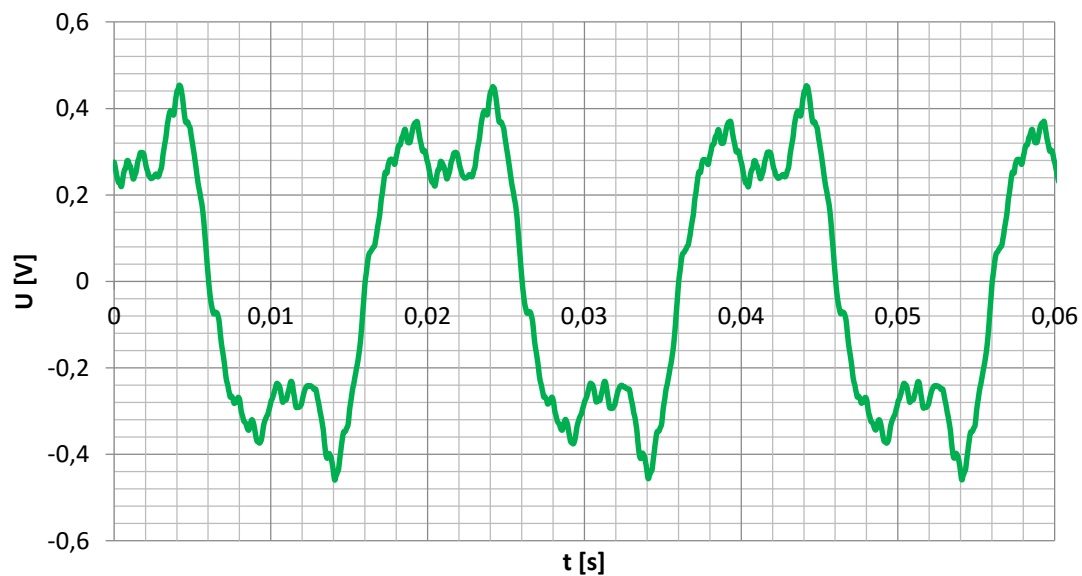
Obr. 39 Frekvenční spektrum hřídelového napětí, před a po výměně rotoru

#### Závěr:

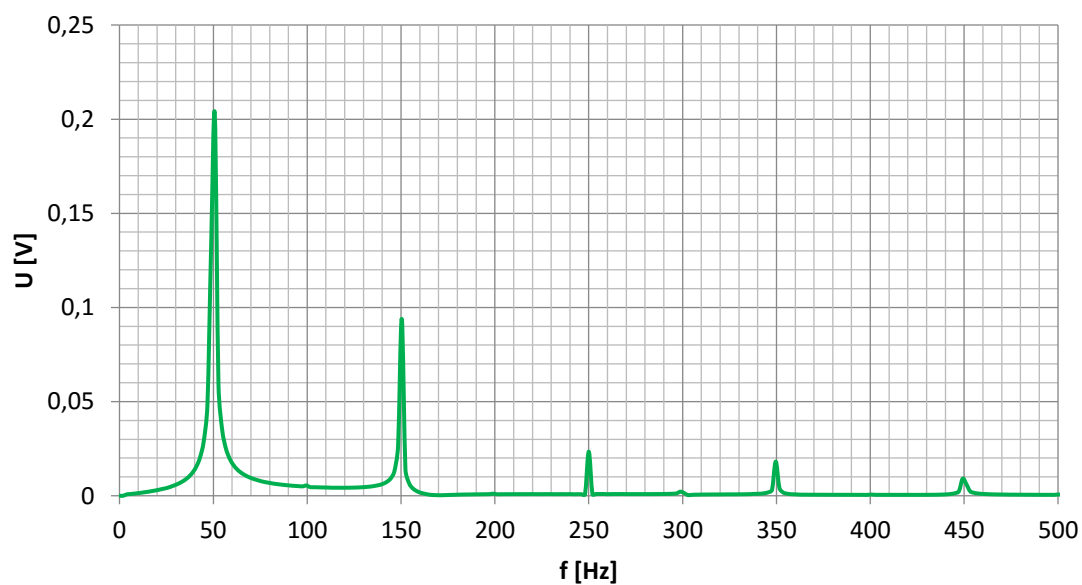
Cílem měření bylo zjistit, jaký vliv má nesymetrie magnetického pole na hřídelové napětí. Pro nevyhovující velikost hřídelových napětí byl vyměněn rotor. Maximální frekvence při jmenovitém napětí 400V byla 2500 Hz, cílem byla základní harmonická s vlivem do 11. vyšší harmonické složky frekvence. Pro měření naprázdno je graf hřídelového napětí pro měření *hřídel – hřídel* je vyobrazen na obr.27. pro napájení síťovým kmitočtem. Je vidět že průběh je zdeformován. Frekvenční spektrum tohoto měření je vyobrazeno na obr.28. Výrazná je 3 a 7. harmonická složka. Při jmenovitém zatížení je sinusový průběh hřídelového napětí zdeformován mnohem více, než při chodu naprázdno. ve frekvenčním spektru je možné pozorovat mírný nárůst 3. harmonické složky a naopak pokles 7. harmonické. Detailním porovnáním z obr.32. je možné vidět, že hřídelové napětí při jmenovité zátěži vzrostlo ze 640 mV na 730 mV. Frekvenční spektrum na obr.33. zobrazuje vliv 3. a 7. harmonické. Zatím co 5.harmonická je zanedbatelně malá. Vliv svorkového napětí na hřídelové napětí je znázorněn na obr.34. Z grafu je patrné, že špičková hodnota amplitudy hřídelového napětí závisí na napájecím napětí. S rostoucím napájecím napětí se však více projevuje deformace vyššími harmonickými složkami. Amplitudy ve frekvenčním spektru na obr.35. se překrývají. Výměnou rotorového svazku došlo k umělému vyvolání nesymetrie magnetického obvodu. Z obr.36. je patrné, že špičková hodnota hřídelového napětí pro 100V je téměř dvojnásobná v porovnání s hodnotami před výměnou (obr.34.)Rozdíl v měření naprázdno a měření při jmenovitém zatížení se ve frekvenčním spektru neprojevil (výskyt 3. a 7. harmonické složky). Při zvyšování svorkového napětí dochází k nárůstu amplitudy, deformaci sinusového průběhu a poklesu amplitudy. To je způsobeno postupným sycením magnetického obvodu (při nízkém napětí je pracovní bod v lineární části magnetizační charakteristiky a postupně se posouvá do oblasti „kolena“). Výměna rotoru neměla vliv na zastoupení jednotlivých harmonických ve spektru ani výrazný vliv na tvar a velikost hřídelového napětí. Vliv nesymetrie by mohl být patrný při větším rozdílu délky rotoru a statoru. Obr.38 a 39. pouze porovnávají hřídelové napětí před výměnou a po výměně rotorového svazku, při jmenovitém pracovním bodě

### 3.1.3 Měření hřídelových napětí na motoru 1LE1504-3AB7- rotor 625 mm

#### a) Pracovní bod 400V, 50Hz

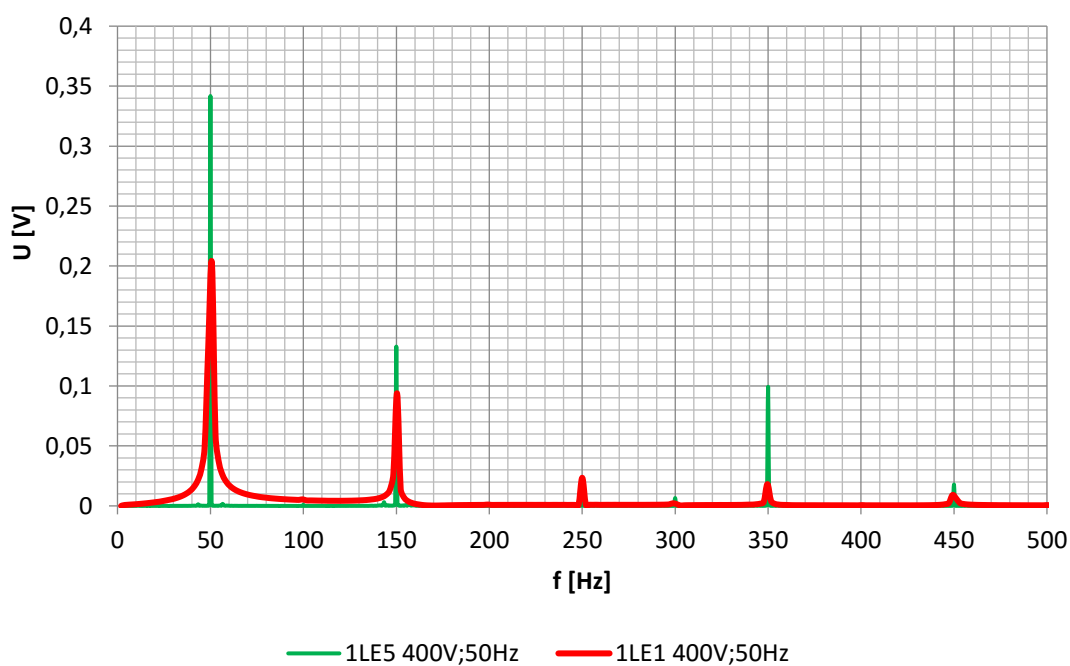


Obr. 40 Průběh napětí na hřídeli při 400V

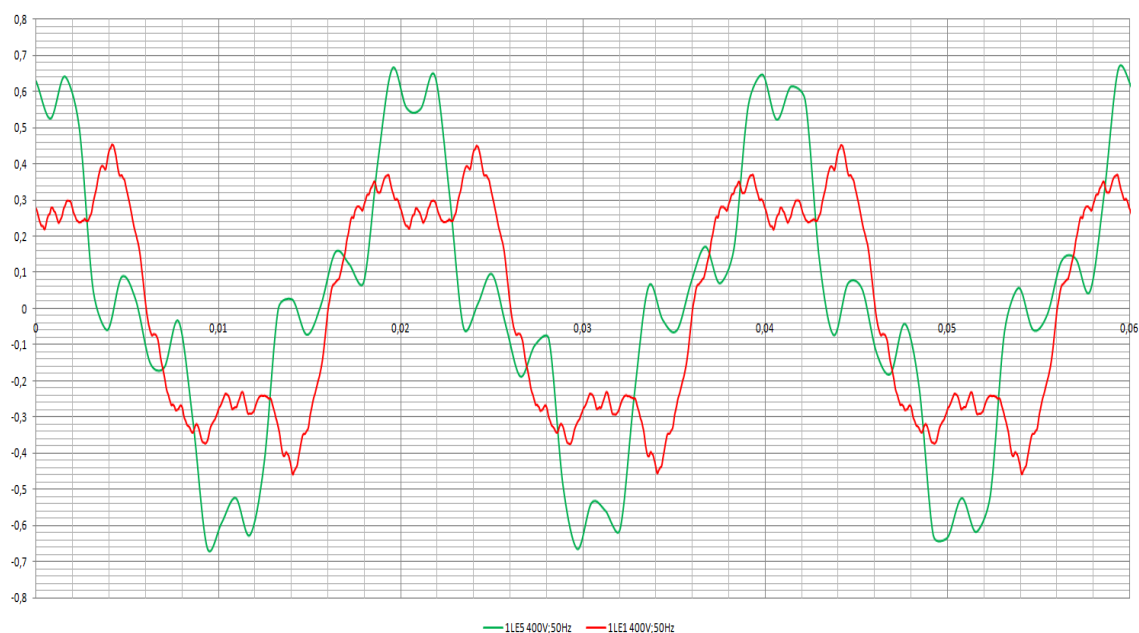


Obr. 41 Frekvenční spektrum při 400V

**Porovnání frekvenčních spekter a průběhů hřídelových napětí motoru 1LE5504-3AB7 a motoru 1LE1504-3AB7**



Obr. 42 Porovnání frekvenčních spekter pro 1LE1 a 1LE5



Obr. 43 Porovnání průběhů hřídelových napětí pro 1LE1 a 1LE5

## Závěr:

U motoru 1LE1 se rovněž u průběhu hřídelového napětí potvrdil výskyt 3. harmonické. U motoru 1LE5 je oproti 1LE1 patrné ve spektru výraznější zastoupení 7. harmonické. Pro vliv velikosti svorkového napětí na velikost a průběh hřídelového napětí platí stejný závěr jako u 1LE5 – posunem pracovního bodu z lineární části magnetizační charakteristiky do „kolena“ se průběh vlivem vyšších harmonických deformuje. Z porovnání frekvenčních spekter pro 1LE1 a 1LE5 je zřejmé, že poměrově je podíl 3. harmonické k základní harmonické u 1LE1 výraznější než u 1LE5. Vhodná metodika a technika měření hřídelových napětí. Rozdíl mezi hřídelovým napětím 1LE1 a 1LE5 činí zhruba 150 mV. Je nutné brát v potaz vlivy jako rozptylové magnetické pole v okolí motoru, působení měřicích sond jako antén, velikost přitlačné síly a plochy sondy na hřídel. Třetí harmonická zřejmě nemá vliv na vyšší velikost hřídelového napětí (pouze na tvar průběhu) – u 1LE1 bylo zastoupení 3. harmonické vyšší, a přesto je u 1LE1 celková velikost hřídelového napětí nižší. Otázkou zůstává výskyt 3. harmonické ve frekvenčním spektru a příčina výraznější 7. harmonické u 1LE5. Průběh hřídelového napětí u 1LE1 vykazuje vyšší podíl harmonických – patrně dáno tím, že pracovní bod se u 1LE1 blíží více ke „kolenu“ magnetizační charakteristiky. Pro další vyhodnocení by bylo vhodné změřit i frekvenční spektrum vibrací. Provést doplňující měření napětí na hřídeli vůči zemi (hřídel – štít; na oboru stranách). Provést stejná měření při napájení motoru z měniče frekvence (hřídel DE-NDE; hřídel-štít), zda bude v souladu s normou ČSN CLC/TS 60034-25. Bylo by vhodné proměření rozptylových magnetických polí.

## 3.2 Vliv nesymetrie vinutí na hřídelové napětí motoru

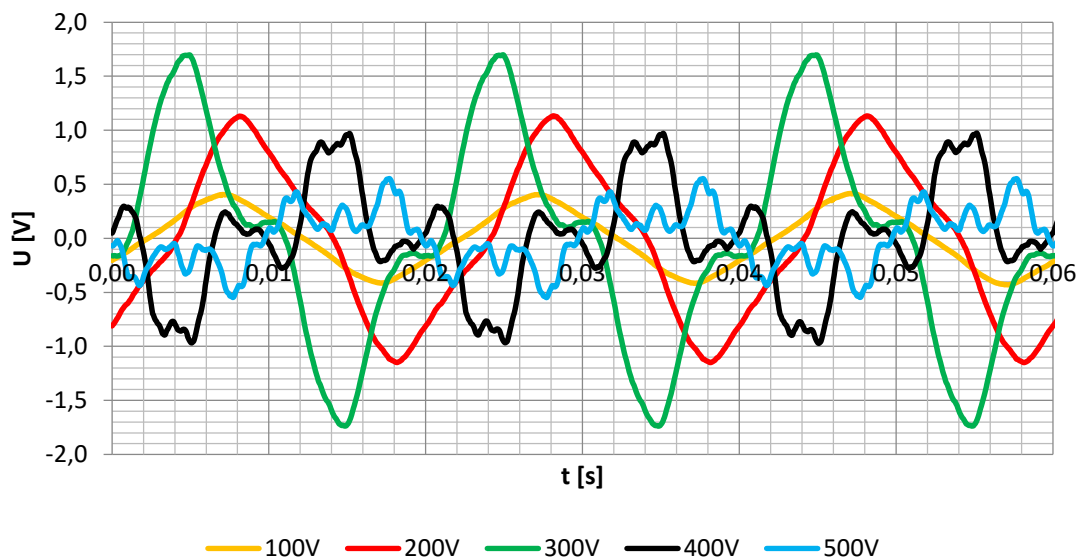
Tab. 2. Základní popis měřených motorů

Verze:	1LE5504-3AB63-4AB0	1LE5504-3AB63-4AB0
Číslo typové zkoušky:	31045-A	31410-A
Specifikace:	18950200	20063500
Jmenovitý výkon:	250 kW	250 kW
Jmenovití napětí:	400 V	400 V
Jmenovitý proud:	440 A	440 A
Zapojení vinutí:	D	D
Jmenovité otáčky:	1490 min <sup>-1</sup>	1490 min <sup>-1</sup>
Zapojení vinutí:	K2	KK
Účíník:	0,86	0,85
Účinnost:	96,7	96,7
Počet drážek statoru:	48	48
Počet drážek rotoru:	40	40
Účinnostní třída	IE4	IE4

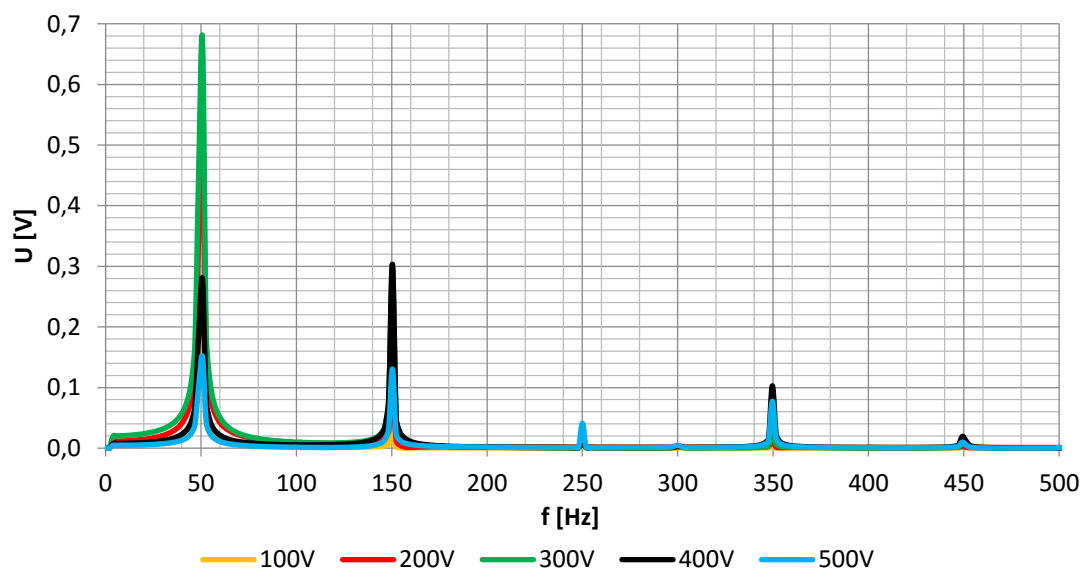
- Měření byla prováděna v souladu s kapitolou 2.8.
- V kapitole 3.3.1. je měření pro statorové vinutí KK, kapitola 3.3.2. je věnována vinutí K2

### 3.2.1 Měření motoru 1LE5504-3AB7 – K2

#### a) Měření *hřídel – hřídel*

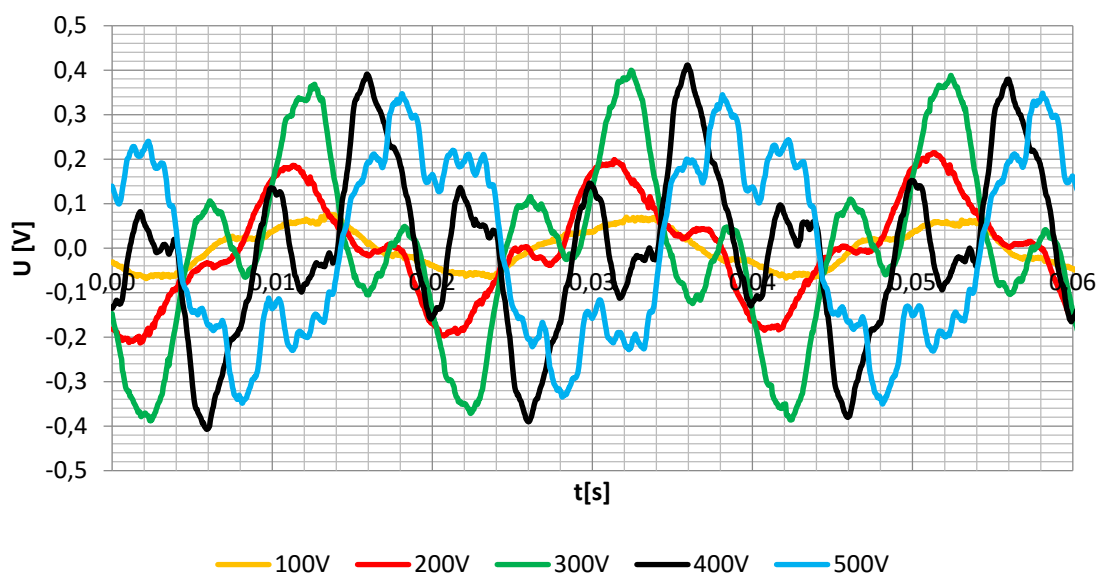


Obr. 44 Průběh hřídelového napětí, pro různá napájecí napětí

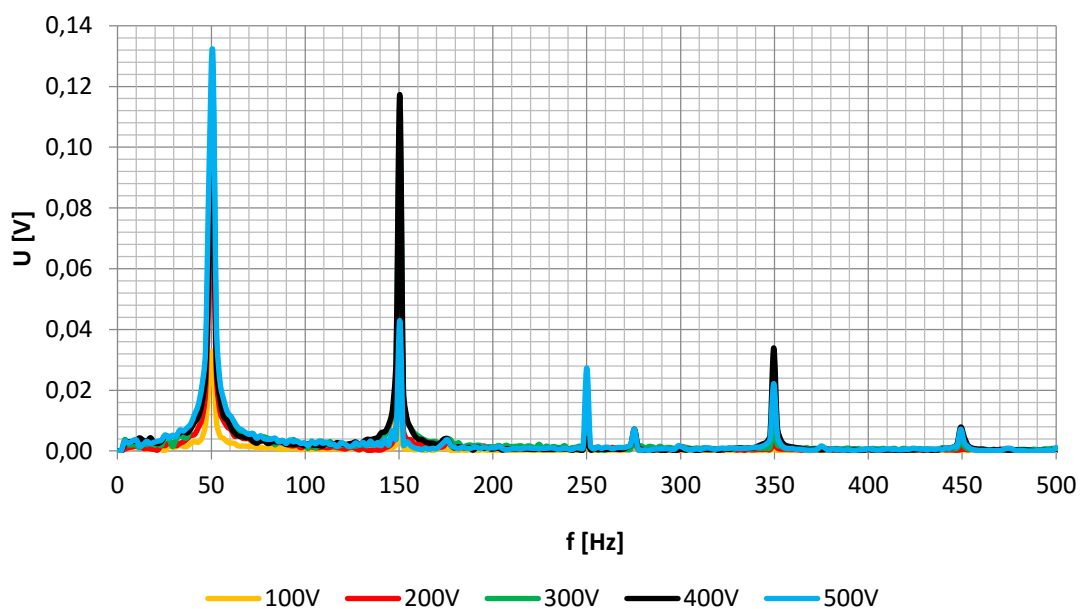


Obr. 45 Frekvenční spektrum napětí, pro různá napájecí napětí

b) Měření *DE strana - štít*



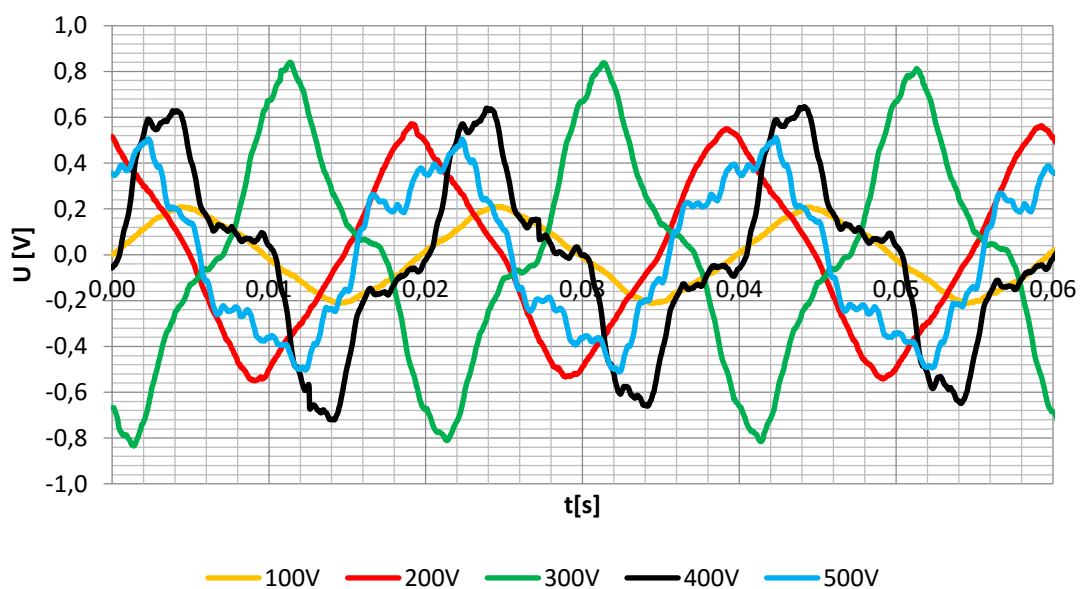
Obr. 46 Průběh hřídelového napětí, pro různá napájecí napětí



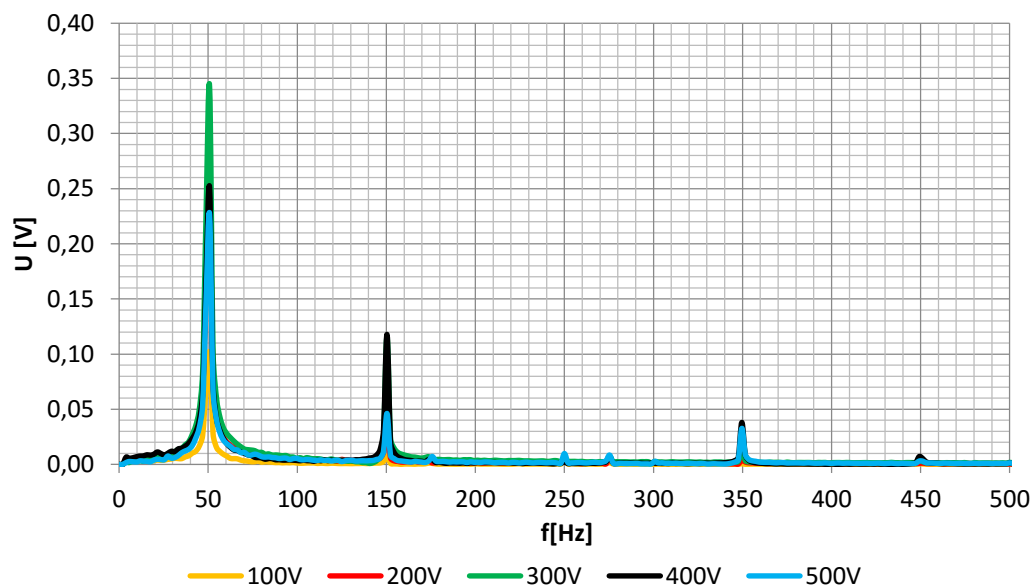
Obr. 47 Frekvenční spektrum hřídelového napětí, pro různá napájecí napětí



c) Měření NDE strana – štít

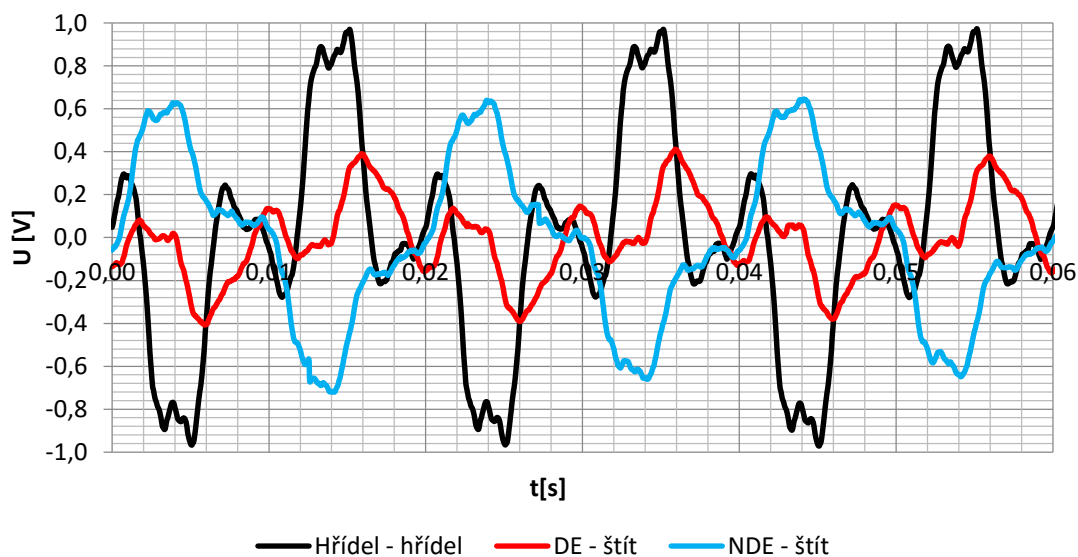


Obr. 48 Průběh hřídelového napětí, pro různá napájecí napětí

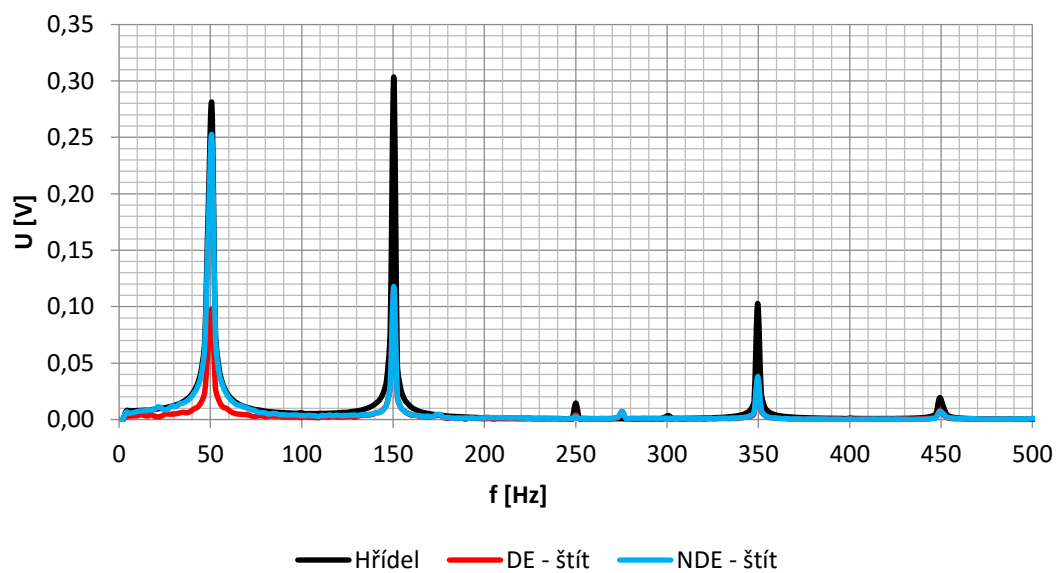


Obr. 49 Frekvenční spektrum napětí, pro různá napájecí napětí

d) Srovnávací měření



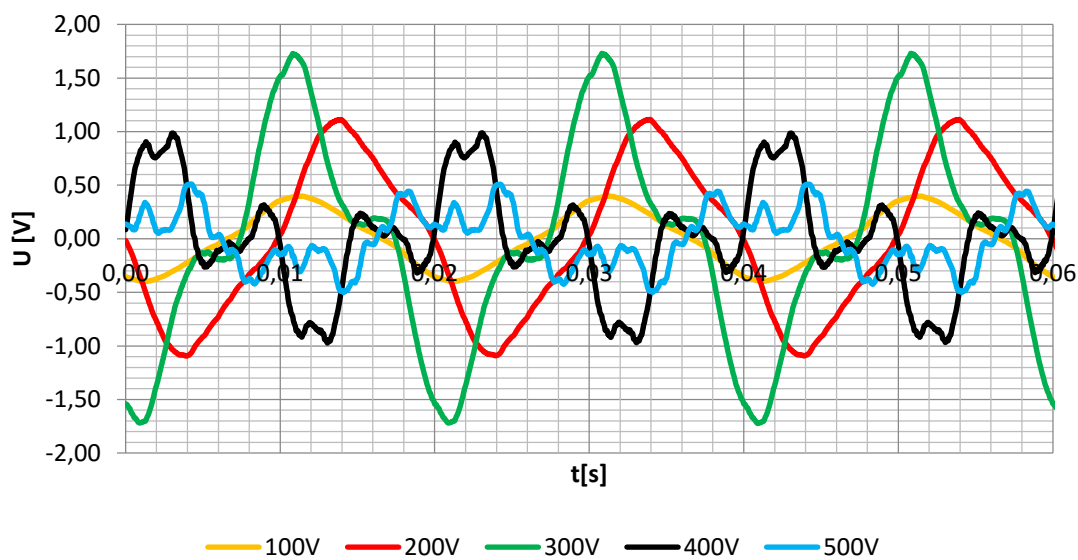
Obr. 50 Průběhy hřídelového napětí pro 400V; *hřídel – hřídel*; *NDE – štít*; *DE – štít*



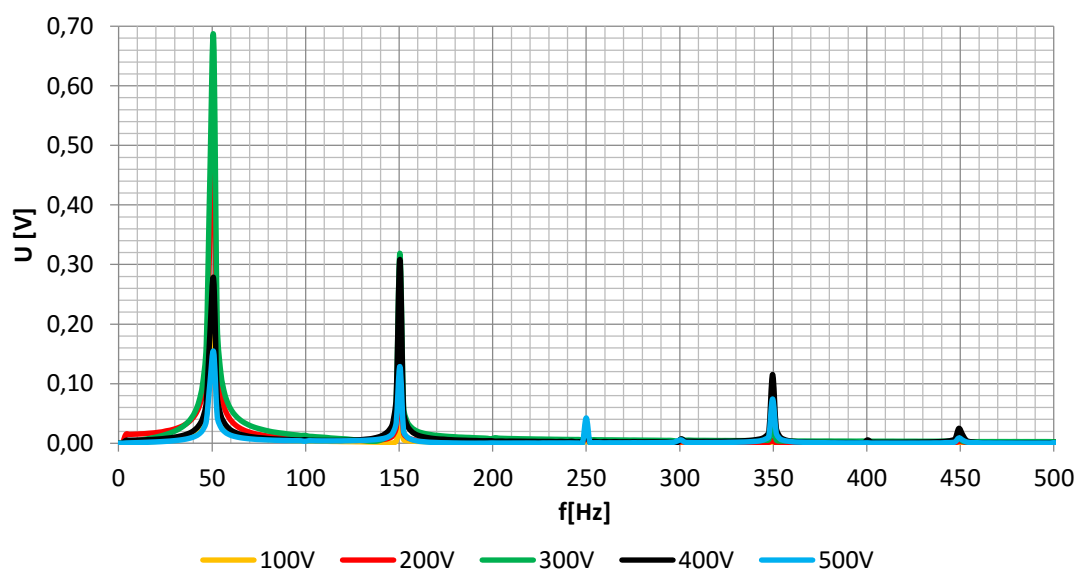
Obr. 51 Frekvenční spektra napětí pro 400V; *hřídel – hřídel*; *NDE – štít*; *NDE – štít*

### 3.2.2 Měření motoru 1LE5504-3AB7 – KK

#### a) Měření *hřídel - hřídel*

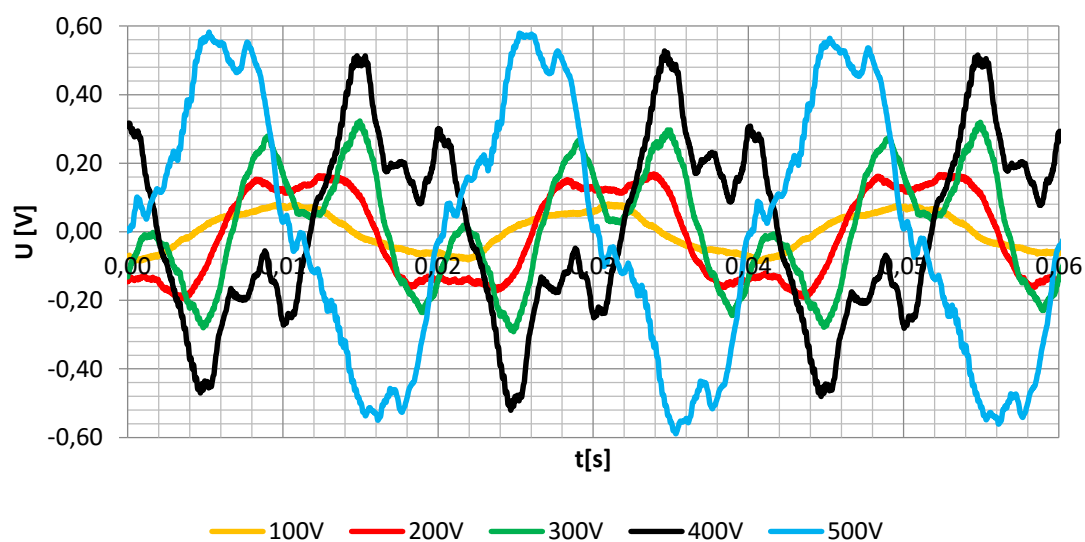


Obr. 52 Průběh hřídelového napětí, pro různá napájecí napětí

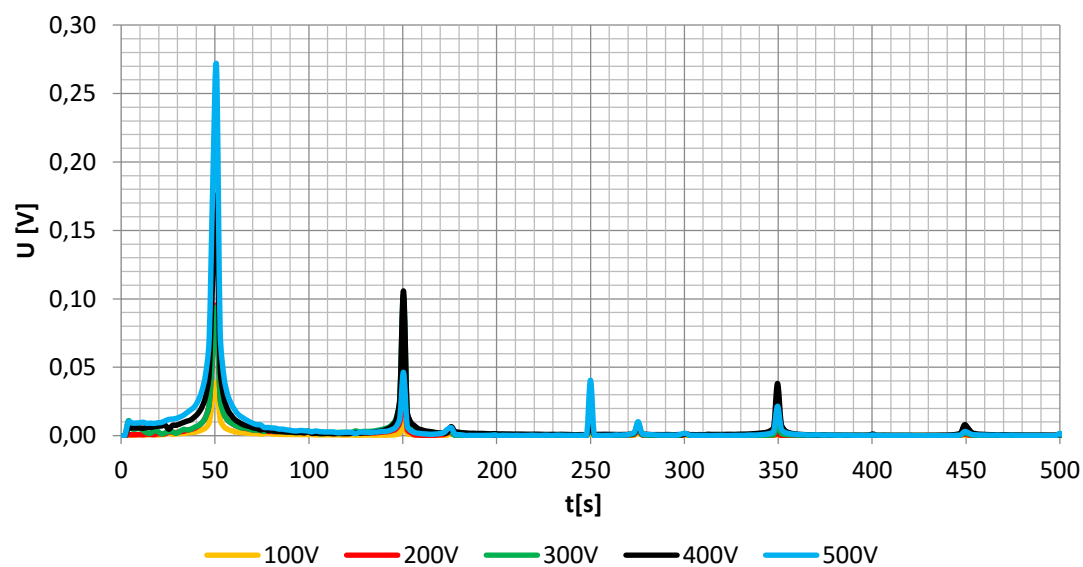


Obr. 53 Frekvenční spektrum napětí, pro různá napájecí napětí

b) Měření *DE strana - štít*

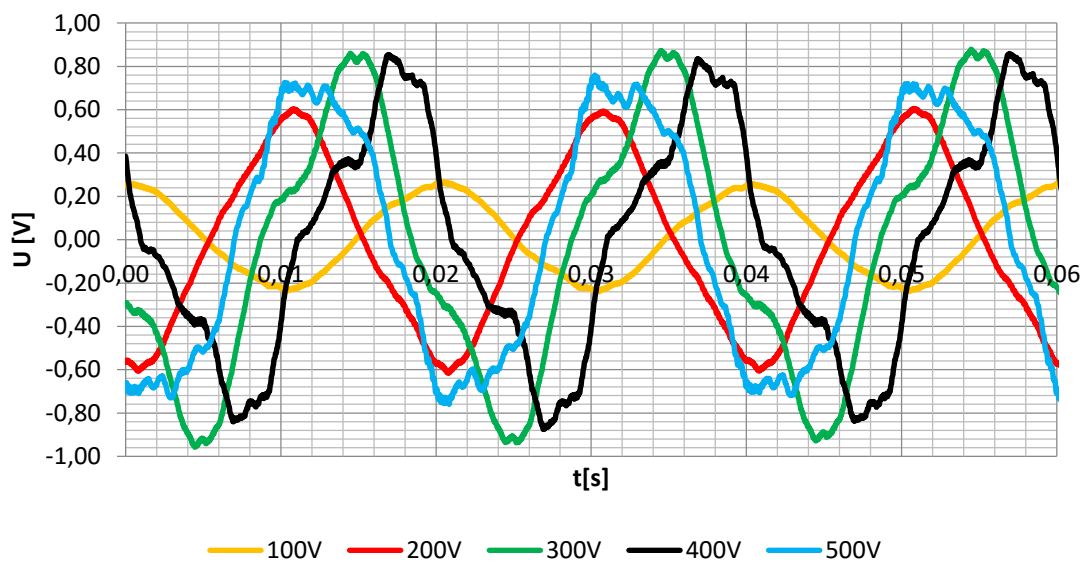


Obr. 54 Průběh hřídelového napětí, pro různá napájecí napětí

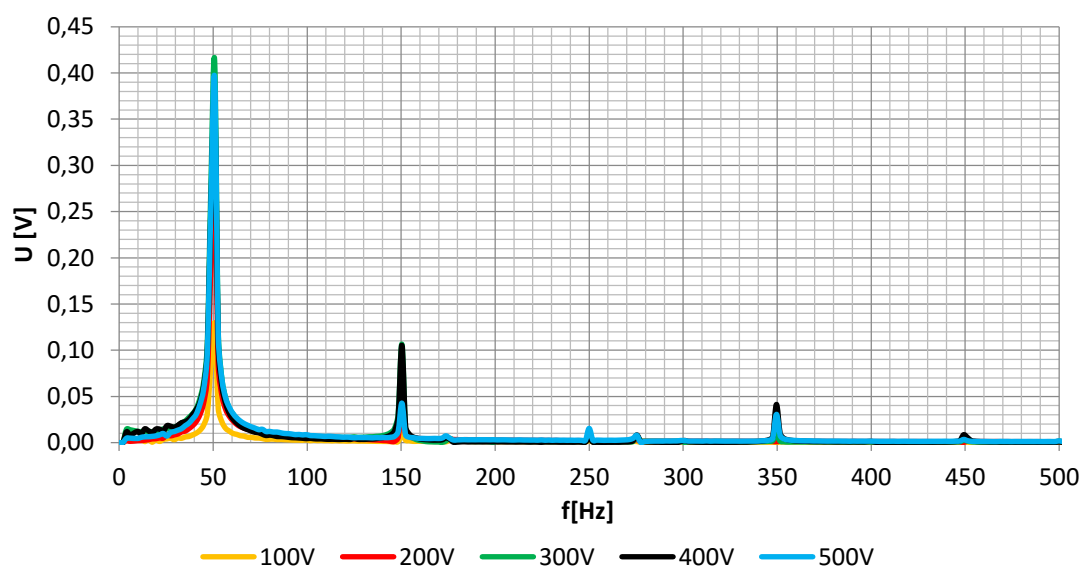


Obr. 55 Frekvenční spektrum napětí, pro různá napájecí napětí

c) Měření NDE strana – štít

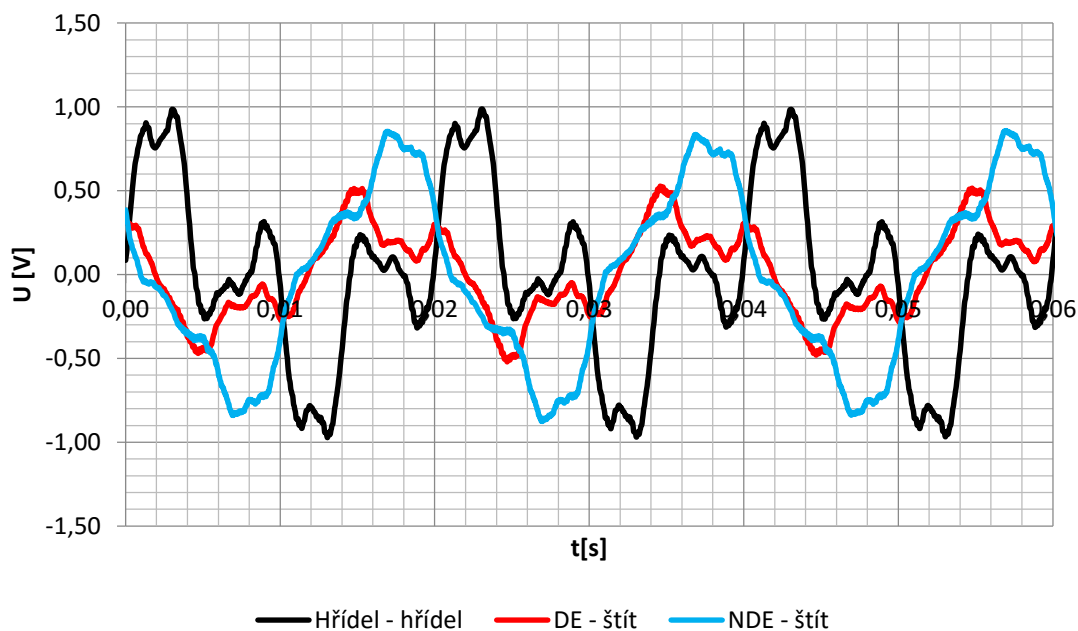


Obr. 56 Průběh hřídelového napětí, pro různá napájecí napětí

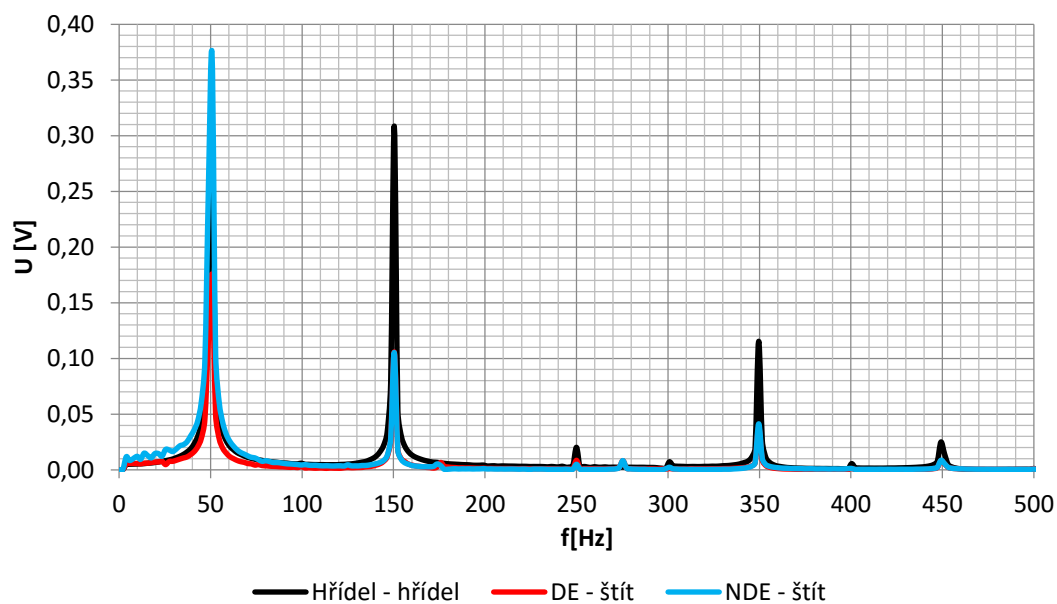


Obr. 57 Frekvenční spektrum napětí, pro různá napájecí napětí

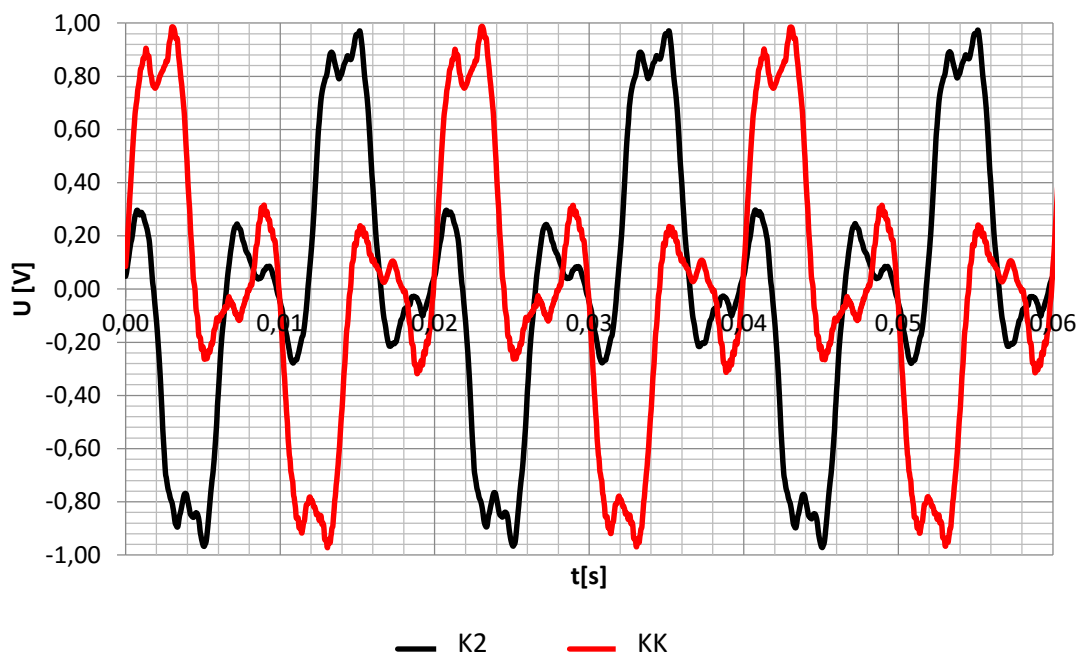
d) Srovnávací měření



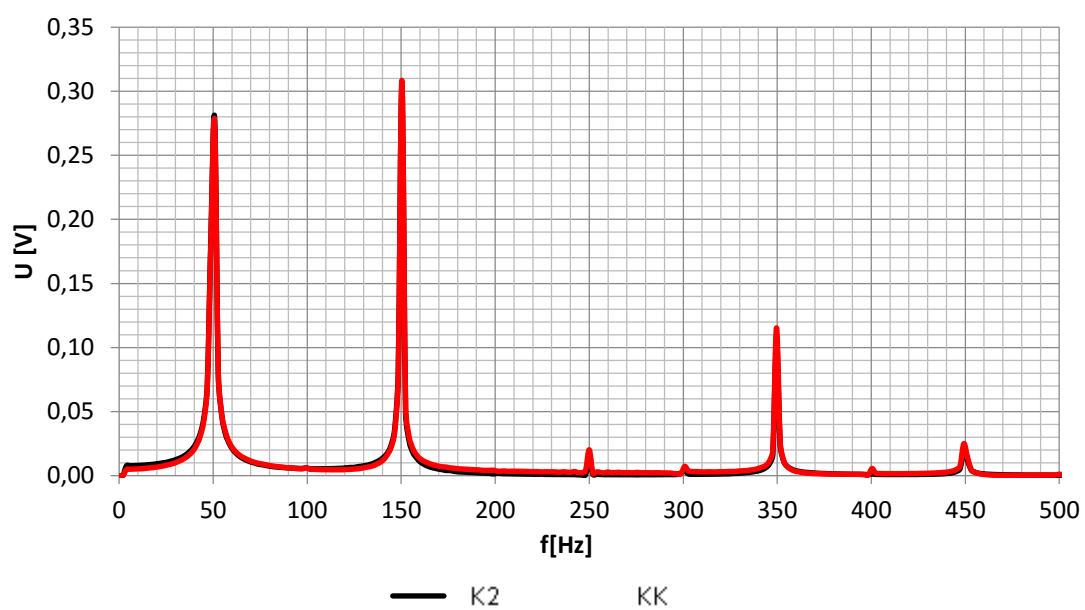
Obr. 58 Průběh hřídelového napětí pro 400V; *hřídel – hřídel*; *DE – štít*; *NDE – štít*



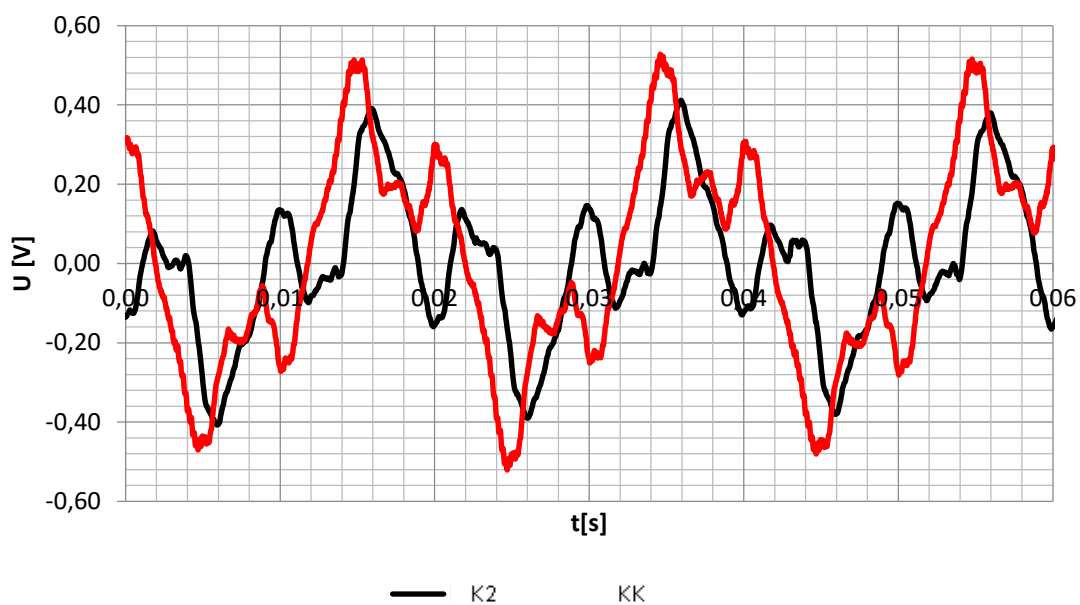
Obr. 59 Frekvenční spektrum napětí pro 400V; *hřídel – hřídel*; *DE – štít*; *NDE – štít*



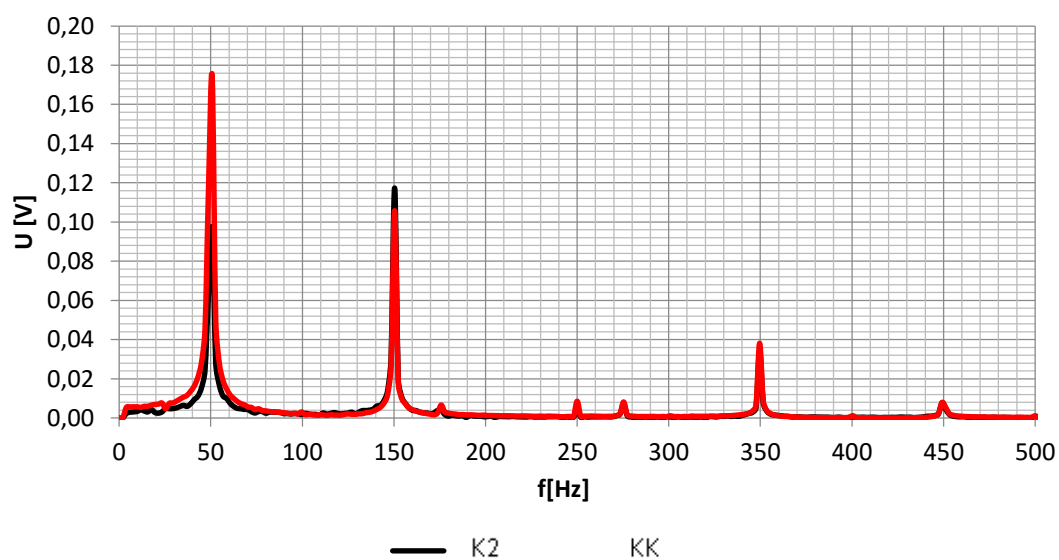
Obr. 60 Průběh napětí *hřidel - hřidel*



Obr. 61 Frekvenční spektrum napětí *hřidel – hřidel*

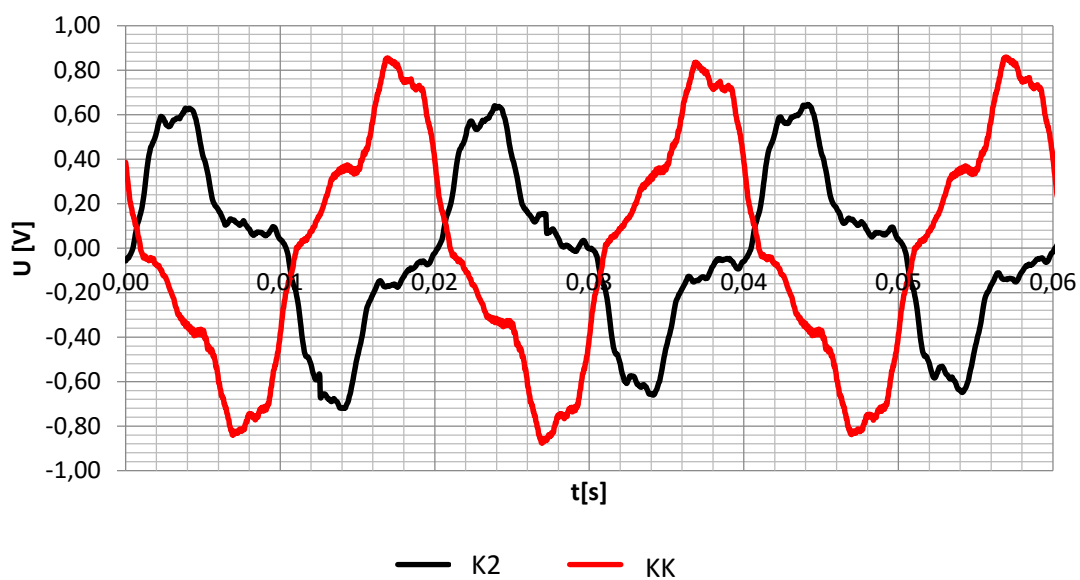


Obr. 62 Průběh napětí *DE štít - hřidel*

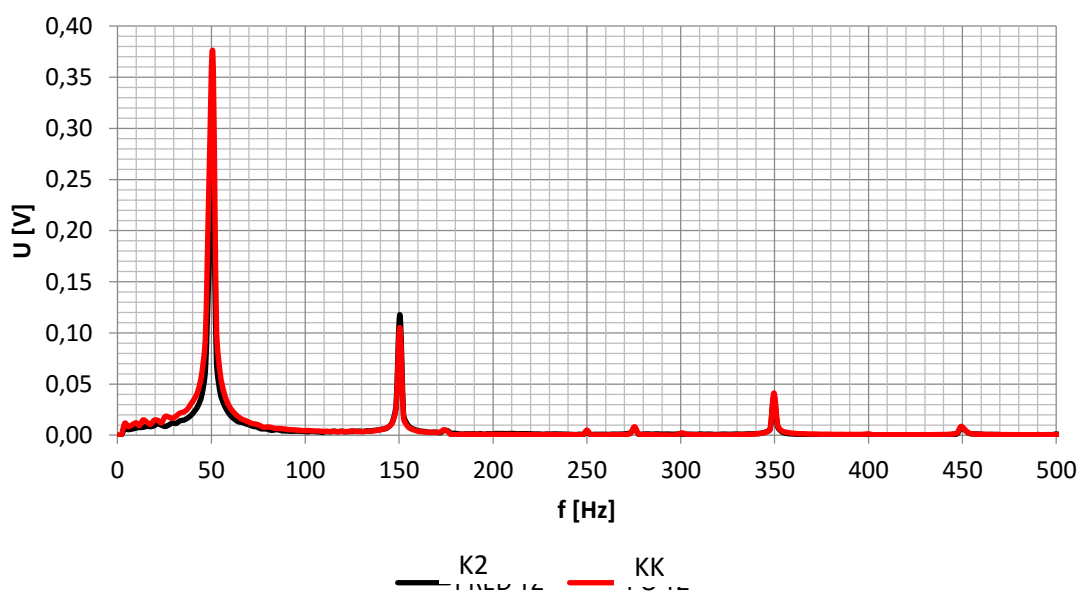


Obr. 63 Frekvenční spektrum napětí *DE štít – hřidel*





Obr. 64 Průběh napětí *NDE štít - hřidel*



Obr. 65 Frekvenční spektrum napětí *NDE štít – hřidel*

## Závěr:

Špičková amplituda hřídelového napětí obr. 44., *hřídel – hřídel* je nejvyšší při svorkovém napětí 300V. Při dalším sycení obvodu je hřídelové napětí více deformováno, viz. obr. 45., kde je patrná 3. harmonická složka. Při měření na straně *DE strana – štít*, došlo k poklesu amplitud všech měřených napájecích napětí. Pro případ pracovního bodu 400V klesla deformace vlivem 3. a 7. vyšší harmonické složky. Při měření na straně *NDE strana – štít*: Došlo k nárůstu amplitud pro pracovní body 400V a 500V napájecího napětí, vliv deformace hřídelového napětí 3. a 7. vyšší harmonické složky se snížil. Začal se projevovat vliv základní harmonické pro tyto dva zmiňované pracovní body. V porovnání obr. 44. Pro vinutí *K2* a obr. 48. Pro vinutí *KK* je méně výrazná amplituda napětí *hřídel – hřídel* i deformace způsobená 3. harmonickou složkou. Špičková hodnota amplitudy hřídelového napětí dosahuje hodnoty 1V. Ve všech spektrech je velmi výrazná 3. harmonická vyššího řádu, viz. obr. 51. a obr. 59. Špičková amplituda hřídelového napětí soustředného hradbového vinutí *K2* byla v porovnání naměřených výsledků *DE štít – hřídel* a *NDE štít – hřídel*, menší, než v případě dvouvrstvého vinutí se stejným krokem *KK*. Pokud se vy stroji výrazně vyskytují liché násobky vyšší harmonické, pak bude nejspíše problém v magnetické symetrii. S naměřenou amplitudou napětí *hřídel – hřídel* cca 1V by bylo vhodné proměření proudu skrz ložiska na kostru stroje a provedení vibrodiagnostiky popřípadě tribodiagnostiky.

### 3.3 Vliv drážkování na hřídelové napětí motoru

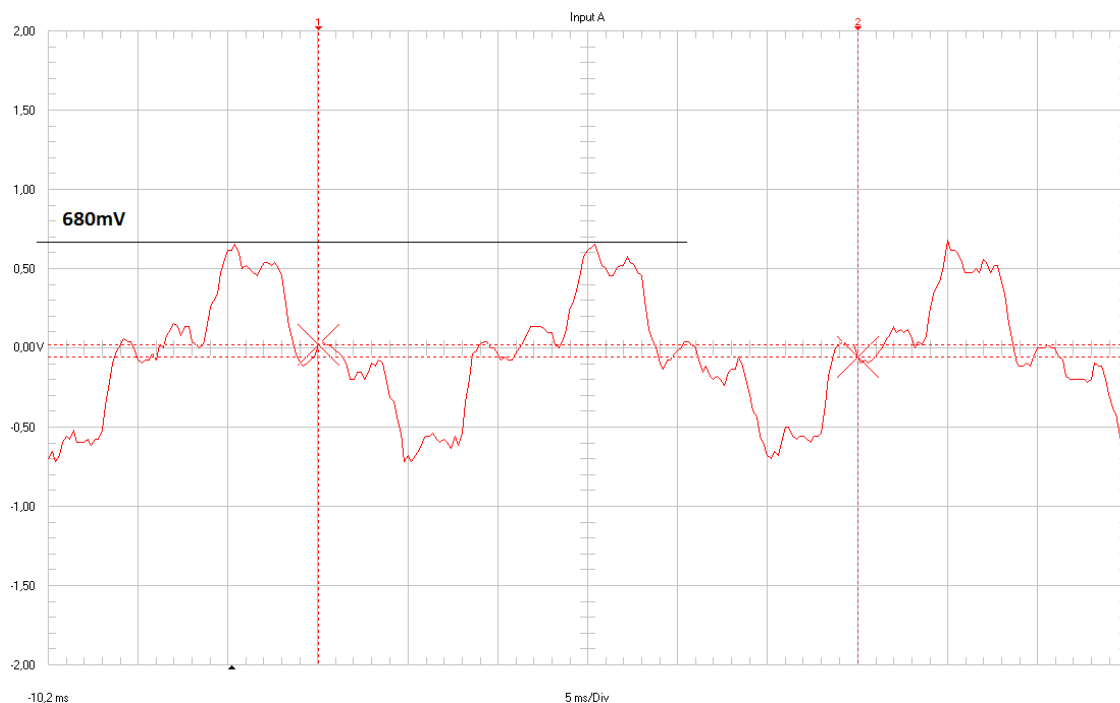
Tab. 3. Základní popis měřeného motoru

<b>Verze:</b>	<b>1LE5534-3AB73-4AB0</b>
<b>Číslo typové zkoušky:</b>	31042-07-A
<b>Specifikace:</b>	18953300
<b>Jmenovitý výkon:</b>	315 kW
<b>Jmenovití napětí:</b>	400 V
<b>Jmenovitý proud:</b>	550 A
<b>Zapojení vinutí:</b>	D
<b>Jmenovité otáčky:</b>	1488 min <sup>-1</sup>
<b>Účíník:</b>	0,85
<b>Počet drážek statoru:</b>	48
<b>Počet drážek rotoru:</b>	40/56
<b>Účinnostní třída:</b>	IE4

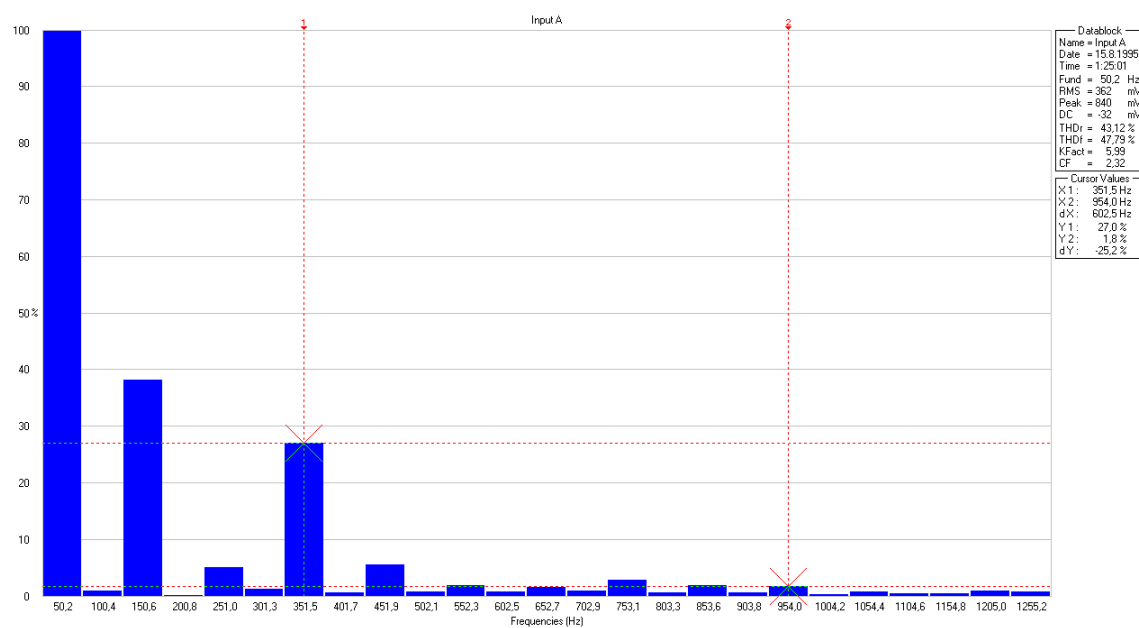
- Měření byla prováděna v souladu s kapitolou 2.8.
- V kapitole 3.3.1. je měření pro 40 drážek na rotoru

### 3.3.1 Měření motoru *1LE5534-3AB73-4AB0* – 40 drážek

#### a) Měření *hřídel – hřídel*

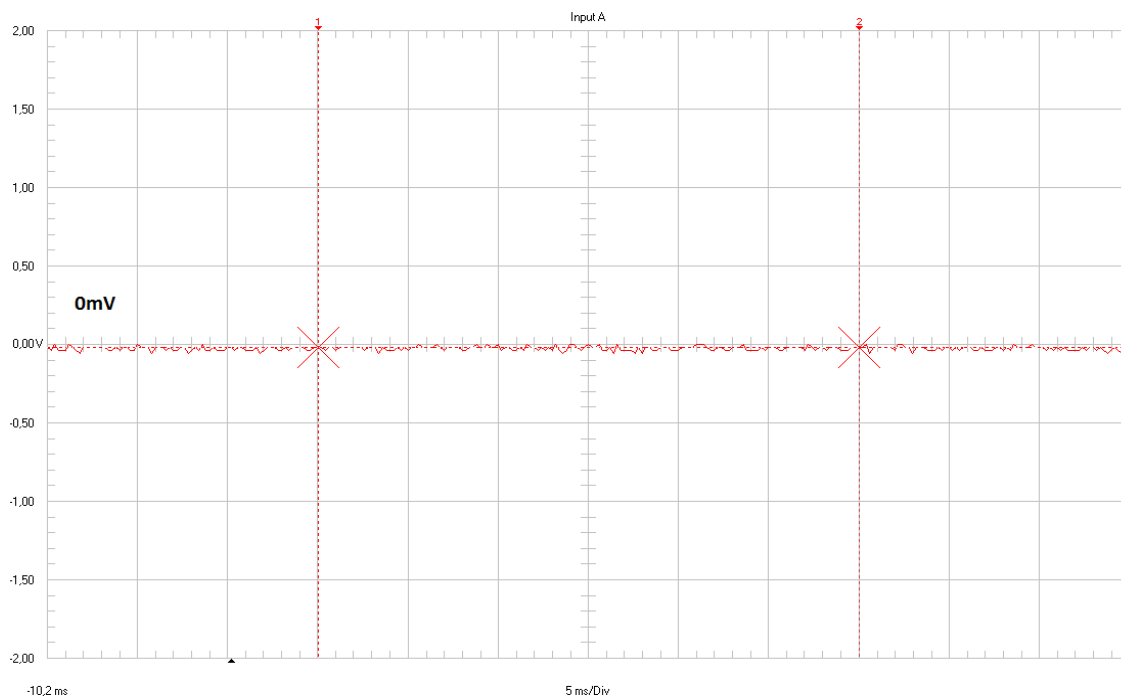


Obr. 66 Průběh hřídelového napětí *hřídel – hřídel*

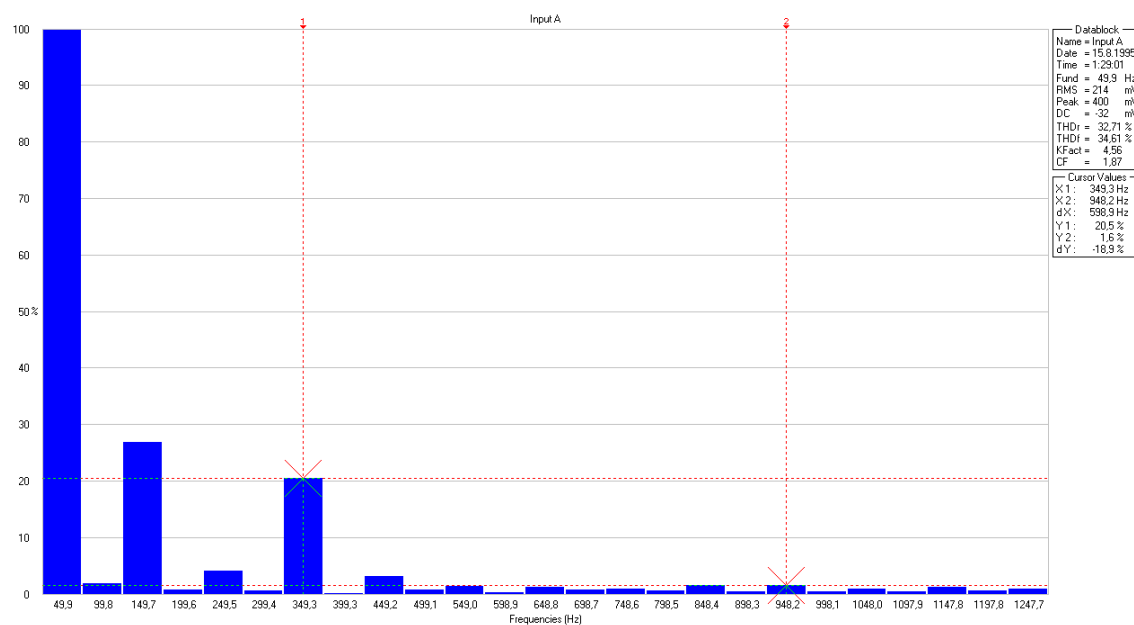


Obr. 67 Frekvenční spektrum; *hřídel – hřídel*

b) Měření *NDE – kostra*

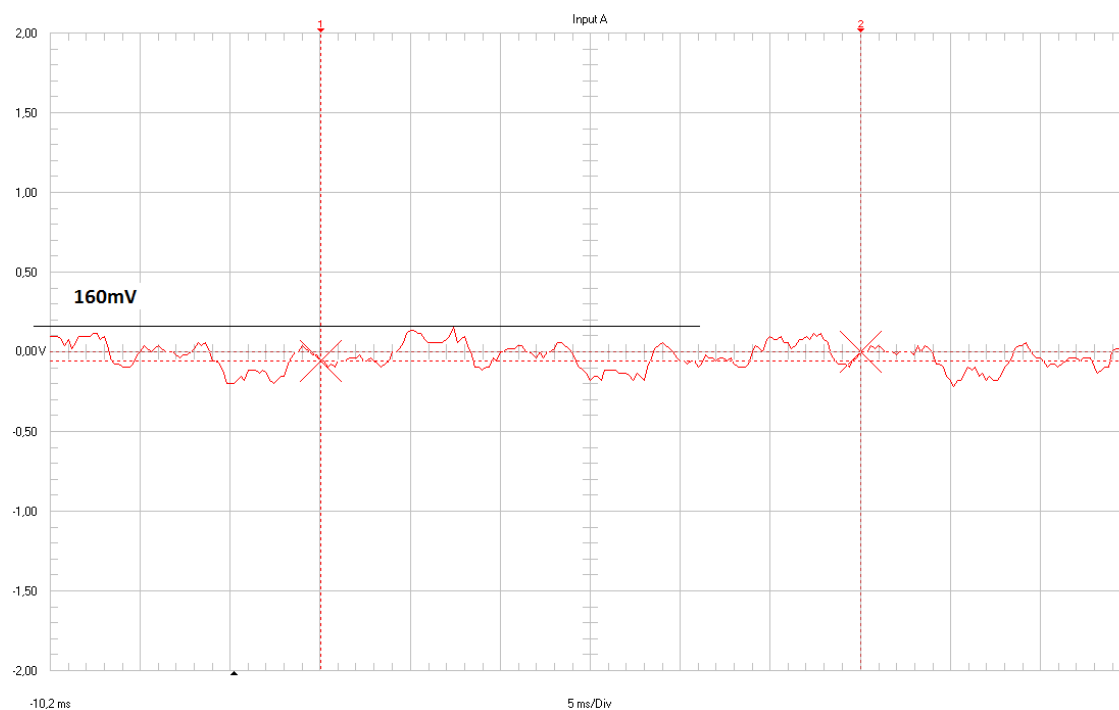


Obrázek 68 Průběh hřídelového napětí *NDE – kostra*

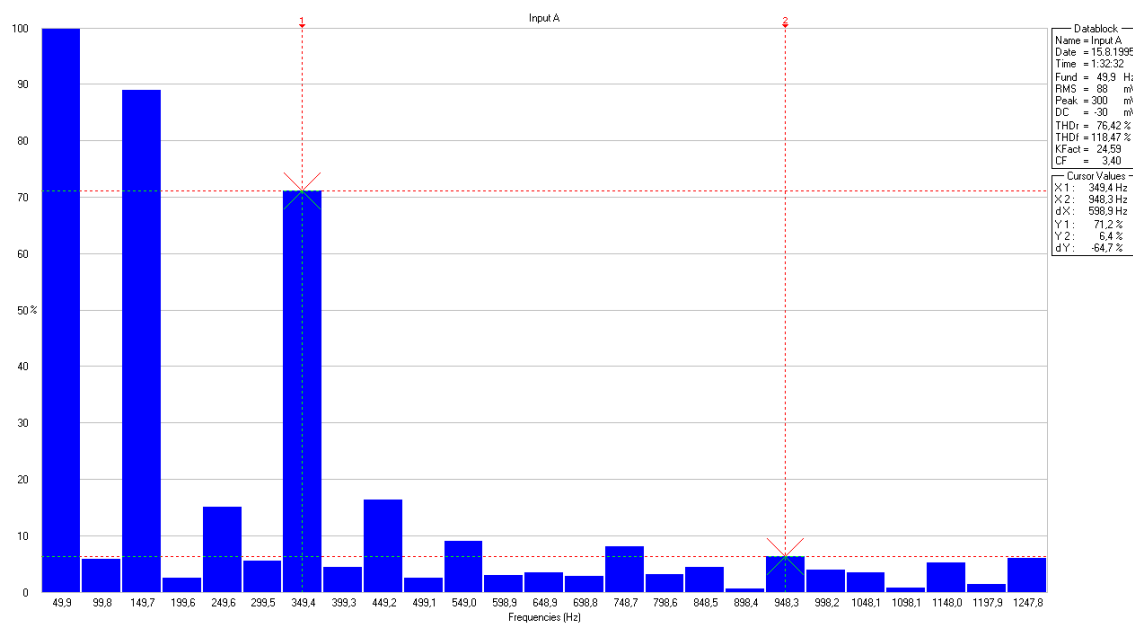


Obrázek 69 Frekvenční spektrum hřídelového napětí *NDE – kostra*

c) Měření *DE* – *kostra*



Obrázek 70 Průběh hřidelového napětí *DE*– *kostra*



Obr. 71 Frekvenční spektrum hřidelového napětí *DE* – *kostra*

## **Závěr:**

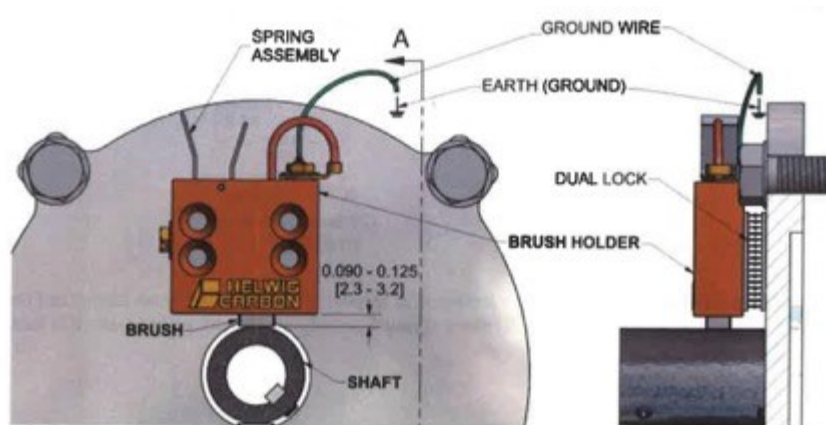
V první řadě bylo prováděno měření bez kartáčů, schematicky je toto měření znázorněno v kapitole 2.5. Měření prováděné *hřídel – hřídel* mělo největší amplitudu a to 680 mV. Při měření *hřídel – hřídel* byla deformace hřídelového napětí vlivem vyšších harmonických a to převážně 3. a 7. bylo nejmenší při použití kartáčů na *DE* i *NDE*. Při měření *NDE - kostra* bylo naměřeno hřídelové napětí v okamžiku zkratování strany *DE* kartáčem. Z tohoto měření lze usoudit, že přes ložisko procházel proud, jelikož má napětí velikost 650 mV, což je více než mezní hranice průrazného napětí pro mazací film ložiska. Zapojení kartáčů na stranu *DE* i stranu *NDE* bylo napětí téměř srovnatelné pro měření *hřídel – hřídel* s poklesem amplitudy 400 mV a *NDE – kostra* 590 mV. Připojením kartáčů došlo k nedokonalému zkratu, litinová kostra stroje tvoří velkou impedanci *Z*. Přesto že, došlo k vytvoření „zkratu“ napětí nepokleslo na 0. Za pomoci klešťového ampérmetru bylo naměřeno proud mezi konci hřídele o velikosti 30A. Ekvivalentní schéma je zobrazeno na obr.2. Výsledky měření s kartáči je v následující kapitole. Použitím kartáče nebo kroužku nebude možné eliminovat hřídelové napětí na úplnou nulu. Vždy je potřeba vzít v potaz jednu z možných příčin popsanych v kapitole 1. Konce hřídele si lze představit jako svorky „zdroje“, v měřeném případě tvrdého zdroje. Bylo-li by indukované napětí na hřídeli rovno 0, pak by nedocházelo k průchodu ložiskových proudů přes ložisko

## 4 Vyhodnocení a návrh vhodných opatření pro eliminaci ložiskových proudů

### 4.1 Přemostění ložiska

#### 4.1.1 Kartáče

Jednou z možností zmenšení vlivu průchodu proudu přes ložisko je využití uhlíkových kartáčů Helwig Carbon BPK-4.

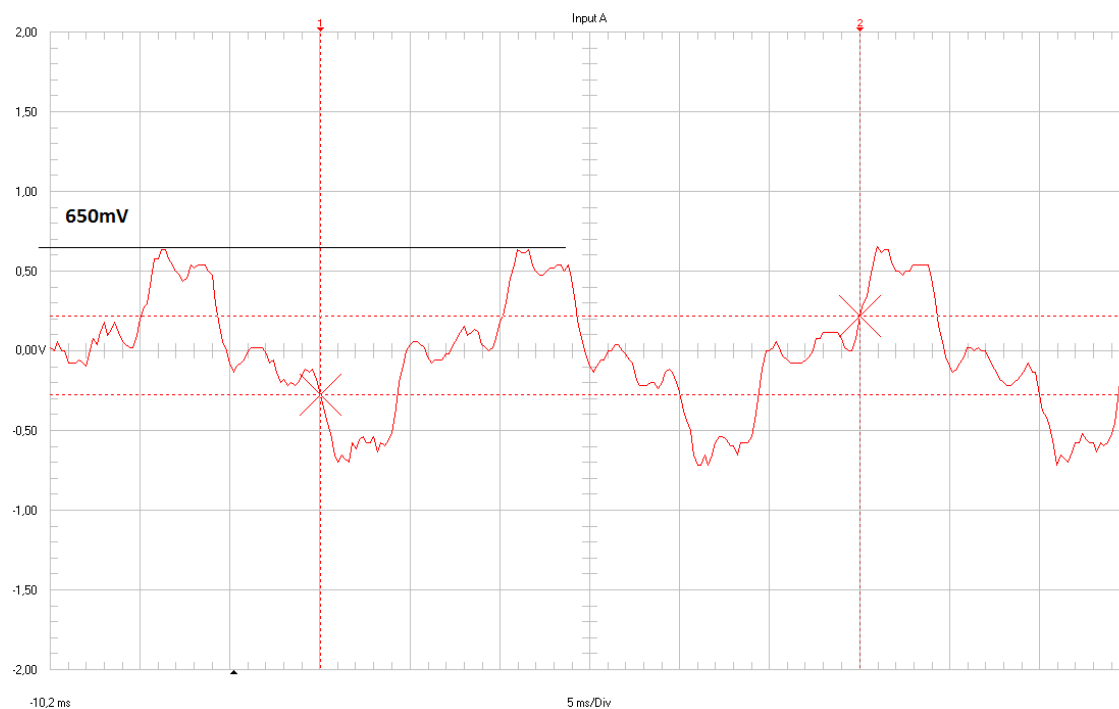


Obr. 72 Schematické připojení kartáče k hřídeli stroje

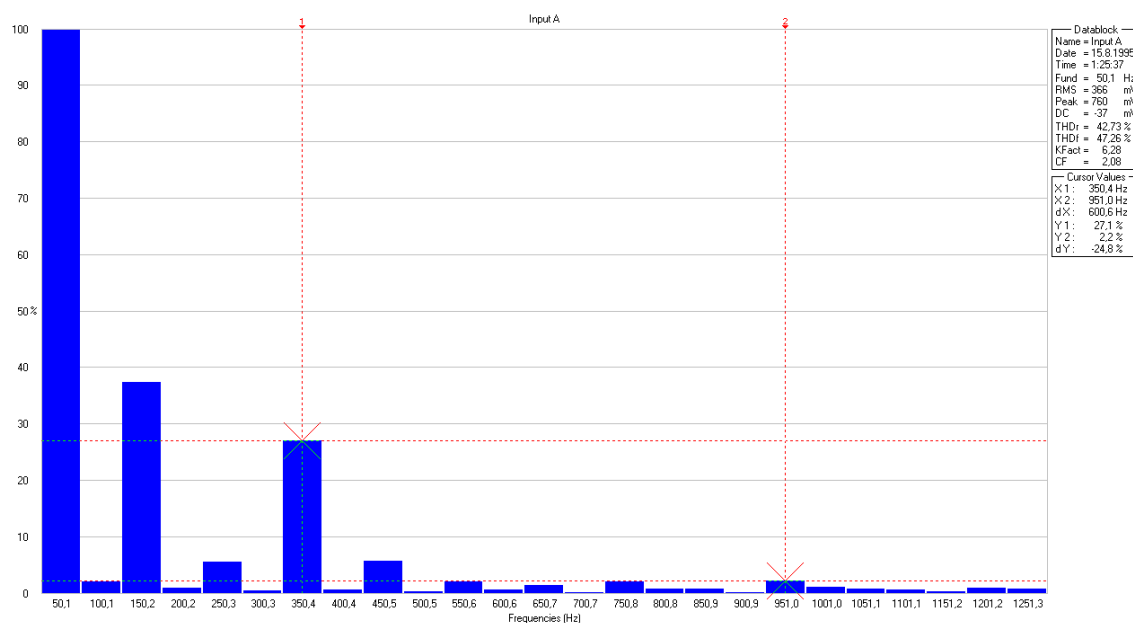
Držák kartáče je tvořen z mosazi, ke kostře stroje je přišroubován. Kartáč je na místě držen pružinou s progresivním tlakem (po celou dobu životnosti stejný přítlak), která zajišťuje potřebný styk s hřídelí. Zalisovaný vodič z kartáče je pomocí šroubového spoje spojen s vodičem kostry. Kartáč se umísťuje na nejvhodnější místo vzhledem ke kontrolám funkčnosti. U rotorů většího průměru je použito dvou kartáčů, ty jsou posunuty o 90° z důvodu vibrací. [30]

#### 4.1.2 Měření motoru 1LE5534-3AB73-4AB0 s použitými kartáči

##### a) Měření *hřídel – hřídel* s kartáčem na *NDE* straně hřídele



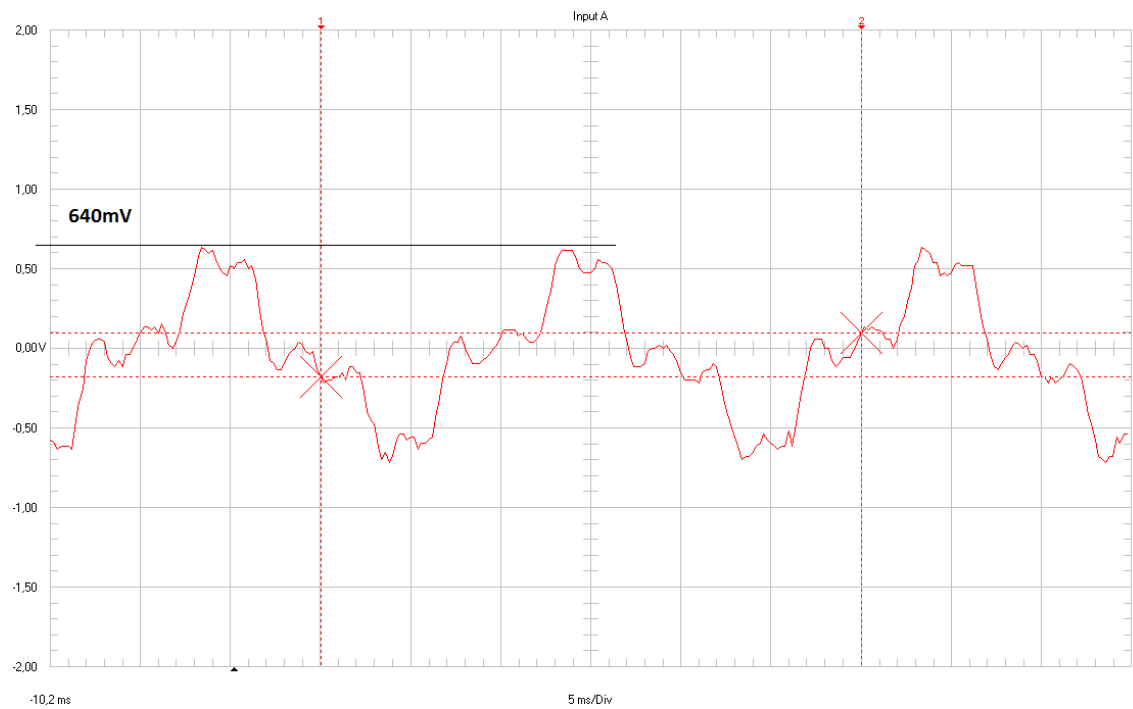
Obr. 73 Průběh hřídelového napětí *hřídel – hřídel*; kartáč na *NDE* straně hřídele



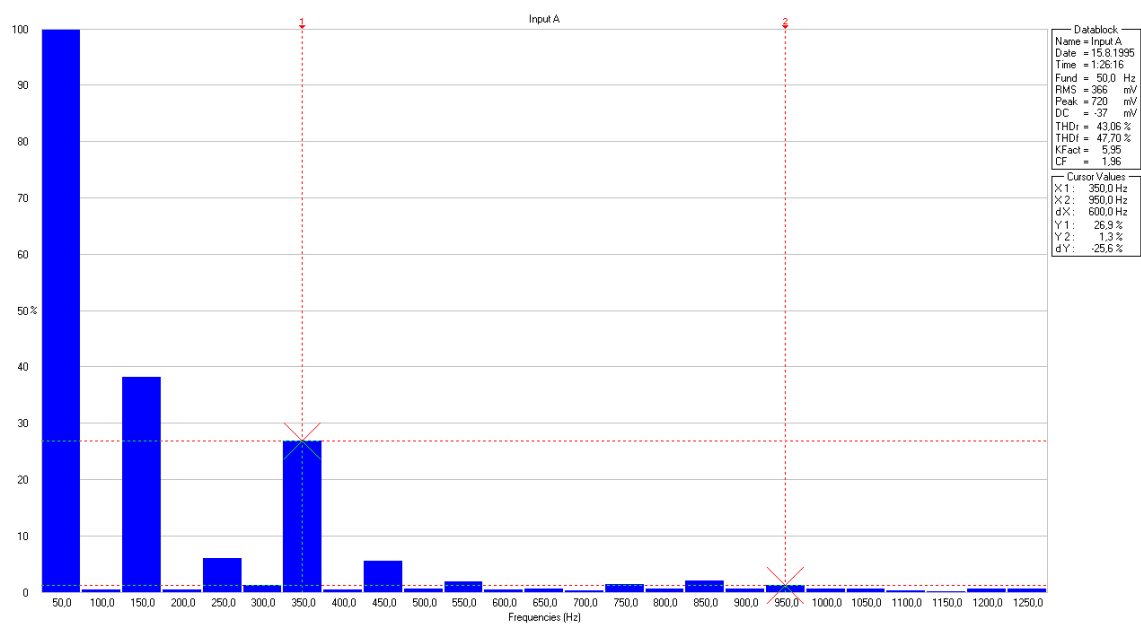
Obr. 74 Frekvenční spektrum; *hřídel – hřídel*, kartáč na *NDE* straně hřídele



**b) Měření *hřidel* – *hřidel* s kartáčem na *DE* straně hřídele**

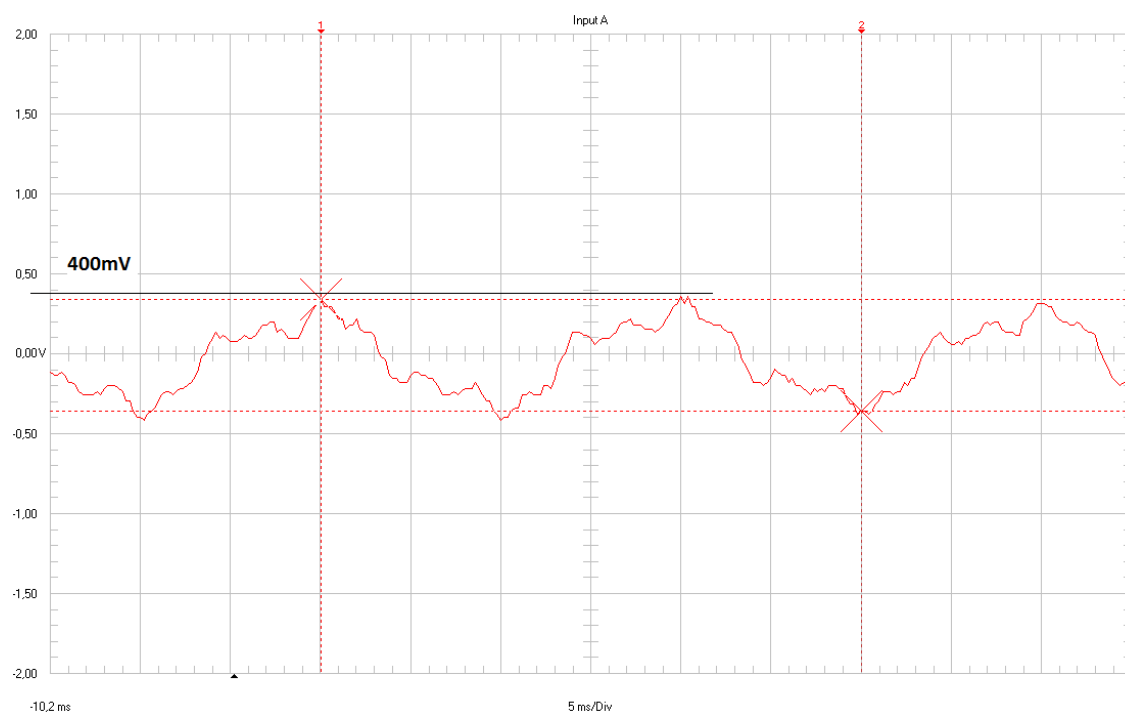


Obr. 75 Průběh hřidelového napětí *hřidel* – *hřidel*; kartáč na *DE* straně hřídele

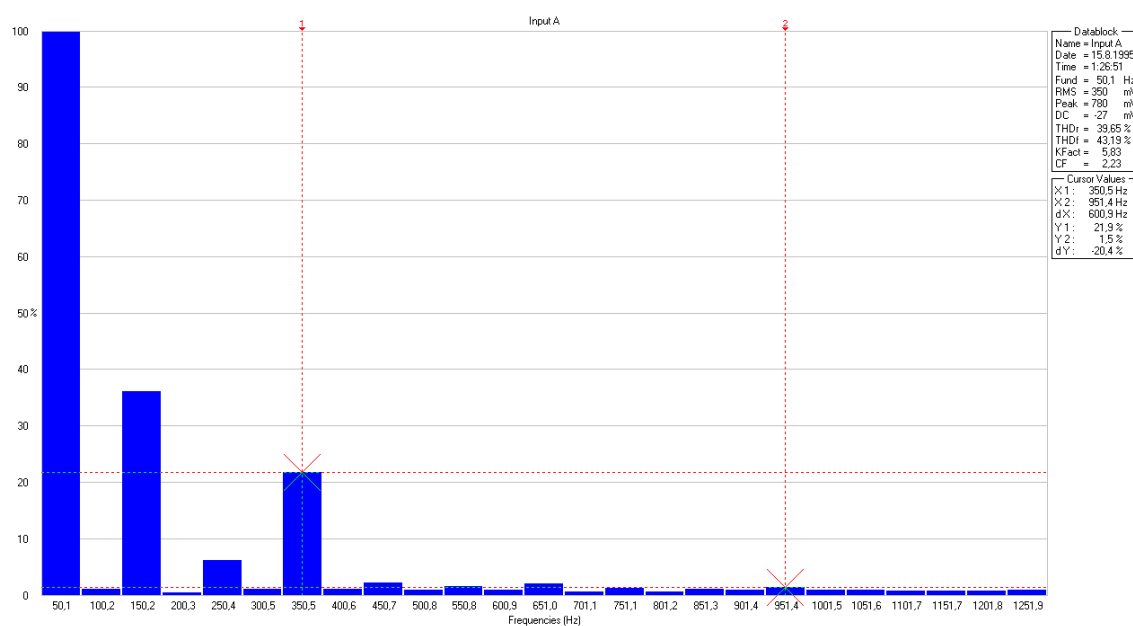


Obr. 76 Frekvenční spektrum; *hřidel* – *hřidel*, kartáč na *DE* straně hřídele

c) Měření *hřidel – hřidel* s kartáči na *NDE* i *DE* straně hřídele

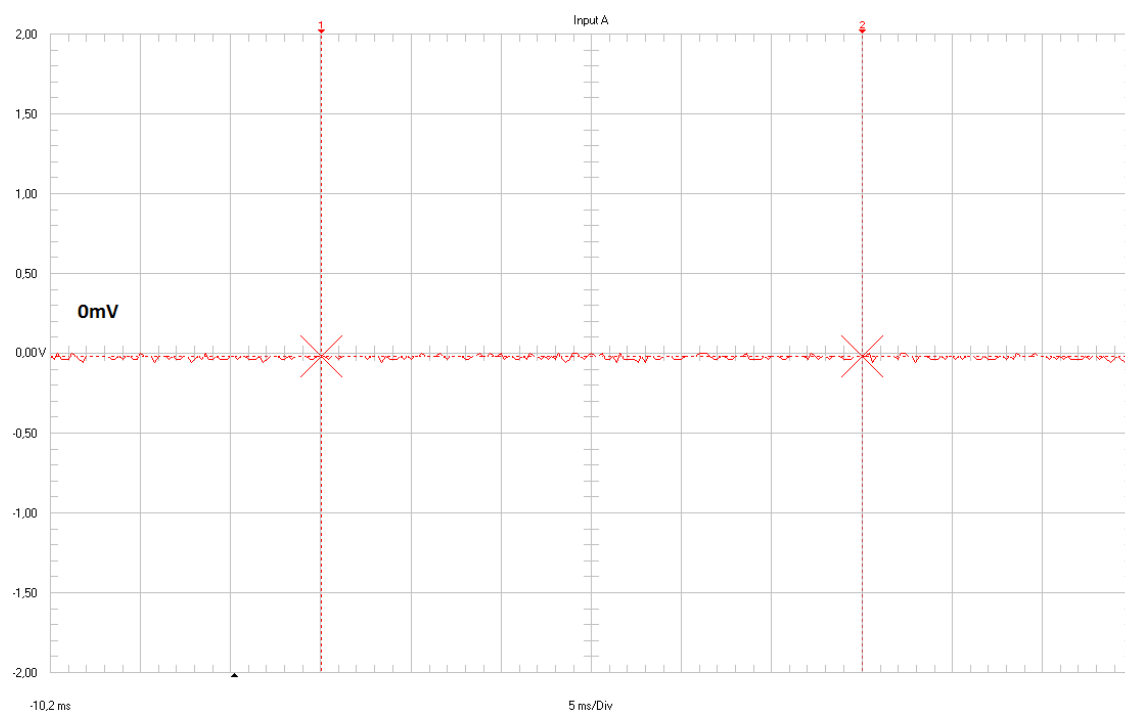


Obr. 77 Průběh hřídelového napětí *hřidel – hřidel*; s kartáči na *NDE* i *DE*

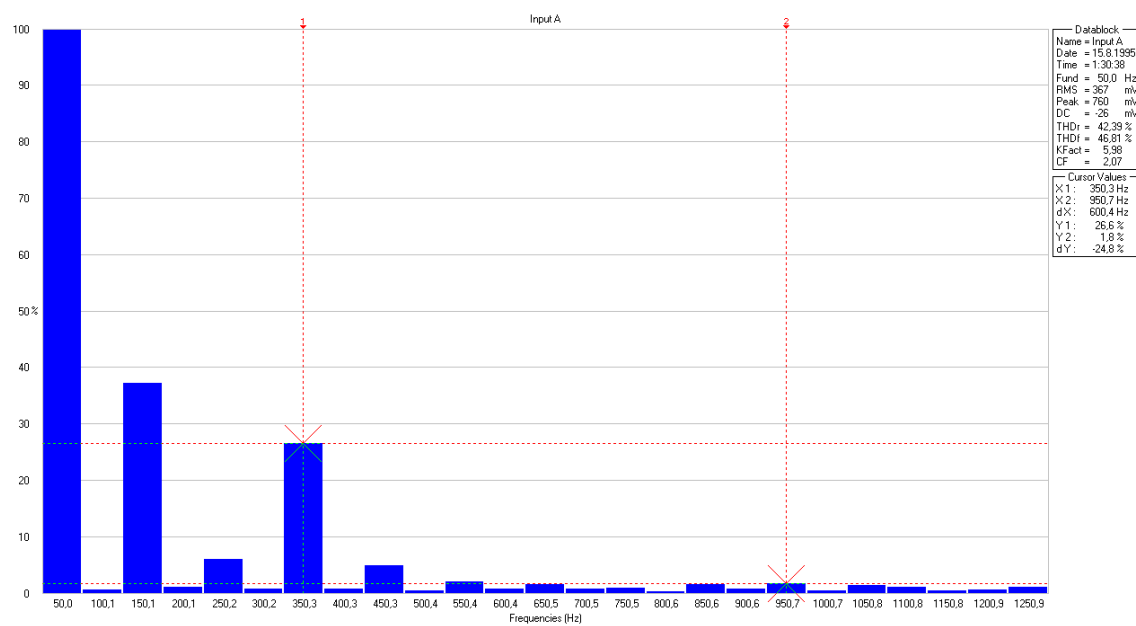


Obr. 78 Frekvenční spektrum hřídelového napětí *hřidel – hřidel*; s kartáči na *NDE* i *DE*

d) Měření *NDE* – *kostra* s kartáčem na *NDE* straně hřídele

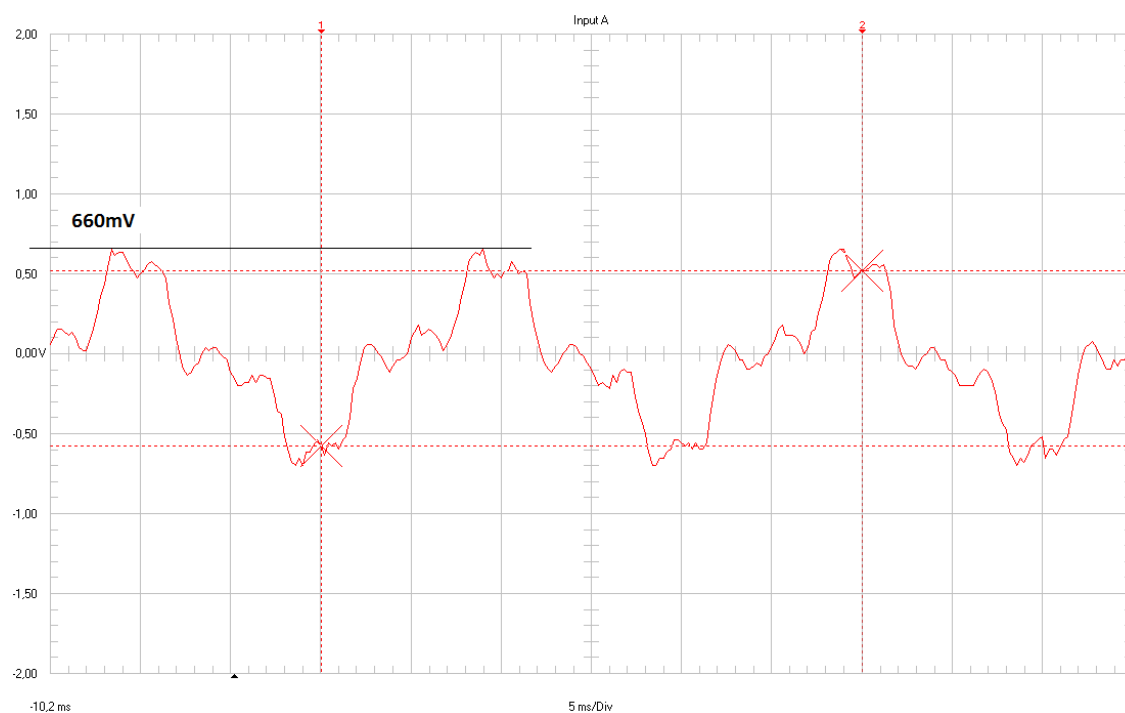


Obr. 79 Průběh hřídelového napětí *NDE* – *kostra*; s kartáčem na *NDE*

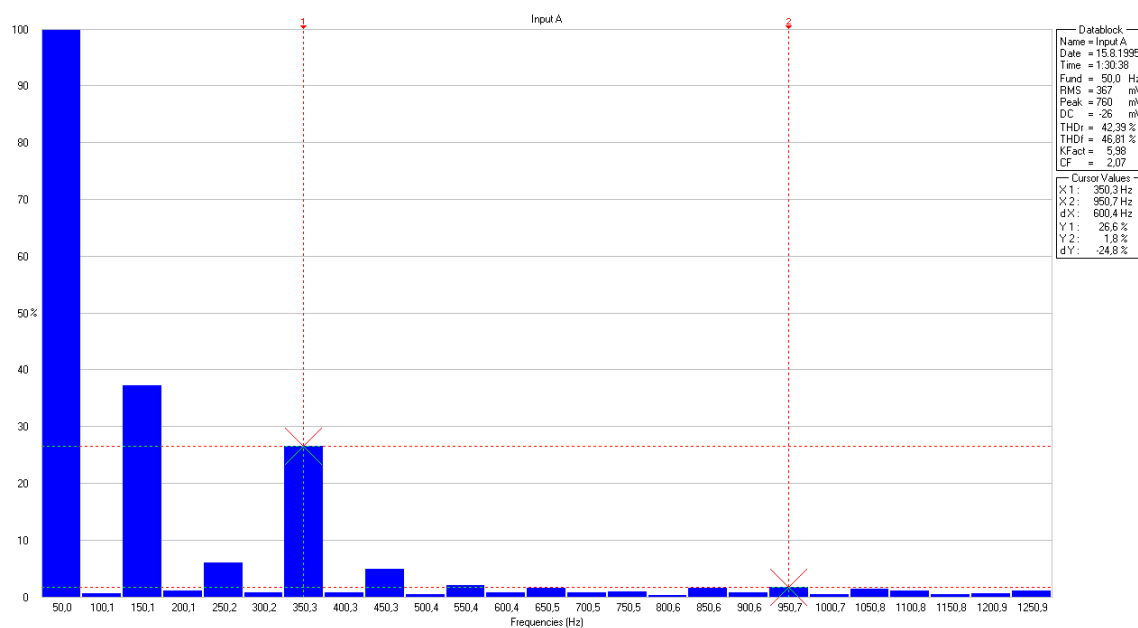


Obr. 80 Frekvenční spektrum hřídelového napětí *NDE* – *kostra*; s kartáčem na *NDE*

e) Měření *NDE* – *kostra* s kartáčem na *DE* straně hřídele

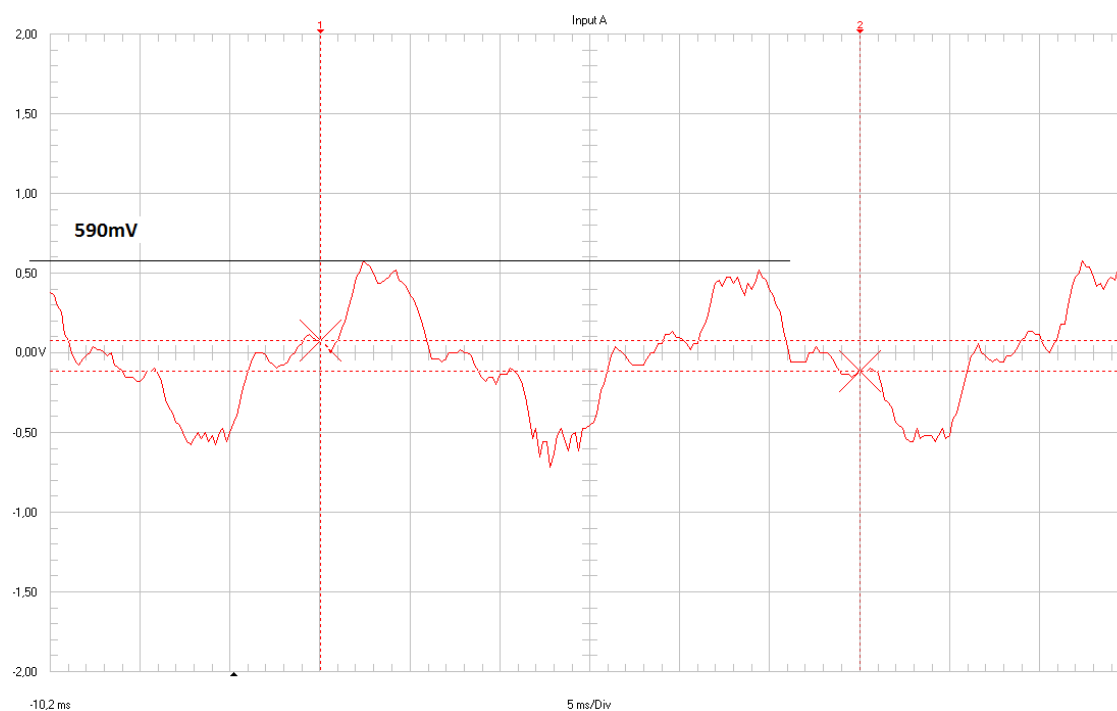


Obr. 81 Průběh hřídelového napětí *NDE* – *kostra*; s kartáčem na *DE*

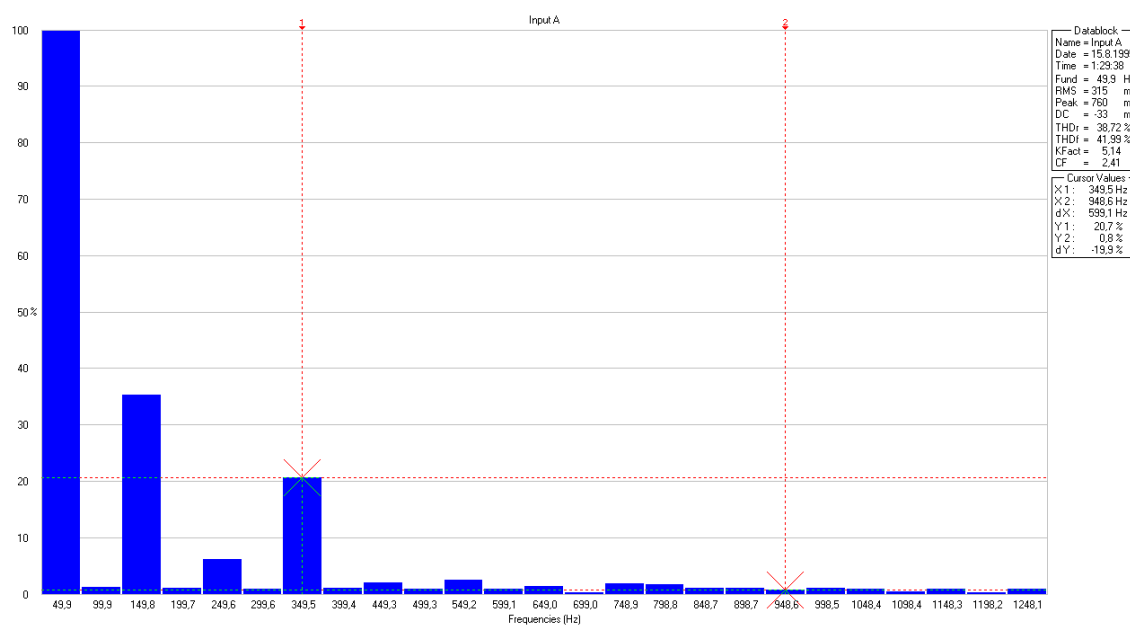


Obr. 82 Frekvenční spektrum hřídelového napětí *NDE* – *kostra*; s kartáčem na *DE*

f) Měření *NDE* – *kostra* s kartáči na *NDE* i *DE* straně hřídele

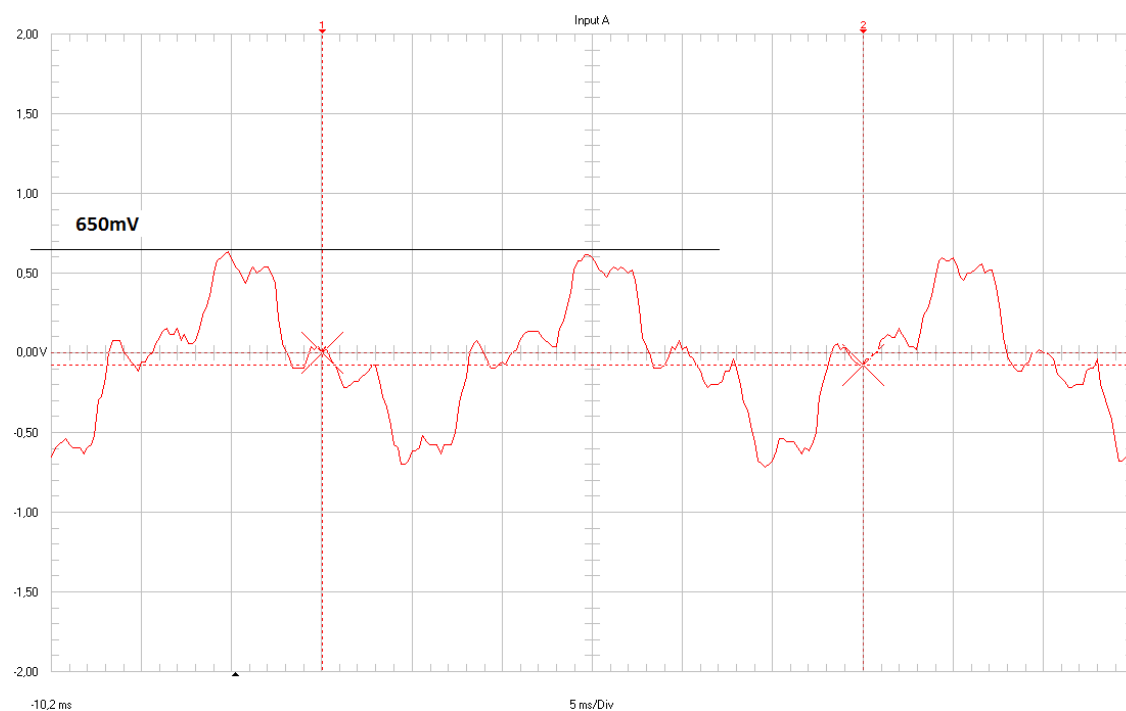


Obr. 83 Průběh hřídelového napětí *NDE* – *kostra*; s kartáči na *DE* i *NDE*

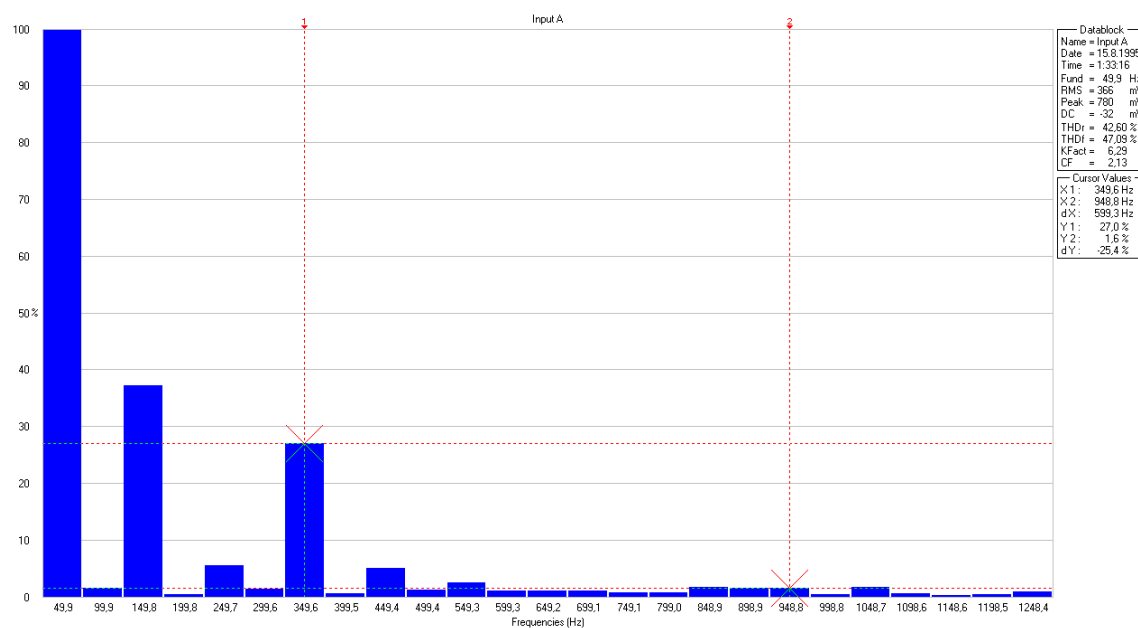


Obr. 84 Frekvenční spektrum hřídelového napětí *NDE* – *kostra*; s kartáči na *DE* i *NDE*

**g) Měření *DE* – *kostra* s kartáčem na *NDE* straně hřídele**

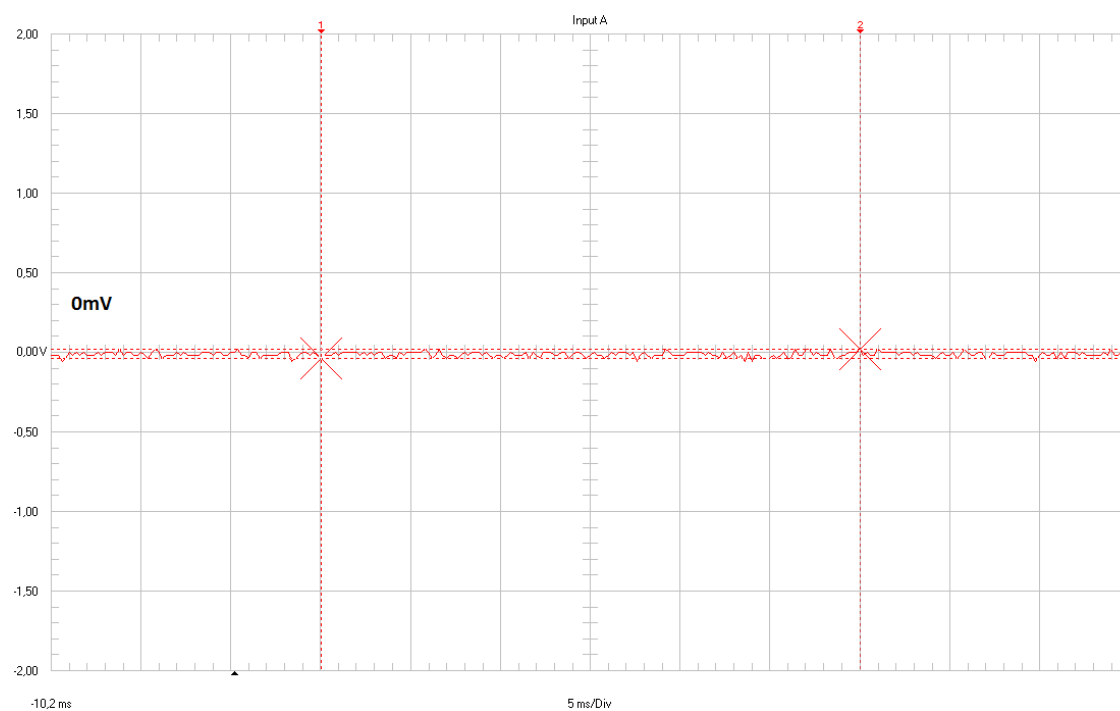


Obr. 85 Průběh hřídelového napětí *DE* – *kostra*; s kartáčem na *NDE*



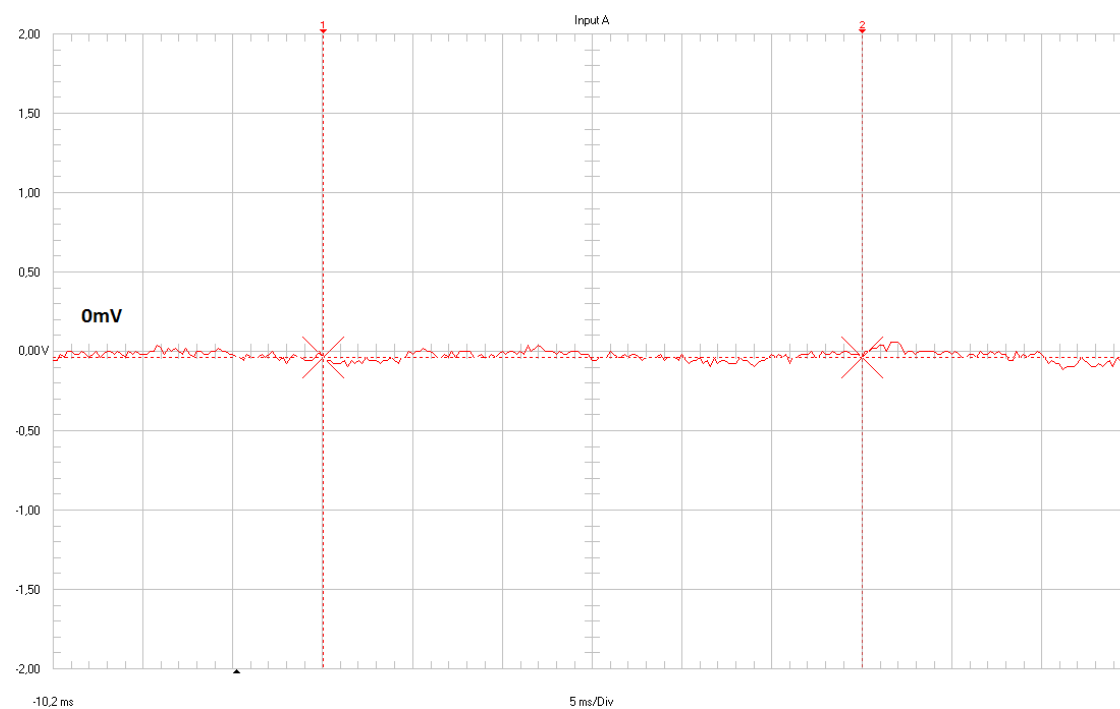
Obr. 86 Frekvenční spektrum hřídelového napětí *DE* – *kostra*; s kartáčem na *NDE*

**h) Měření *DE* – *kostra* s kartáčem na *DE* straně hřídele**



Obr. 87 Průběh hřídelového napětí *DE* – *kostra*; s kartáčem na *DE*

**i) Měření *DE* – *kostra* s kartáči na *NDE* i *DE* straně hřídele**



Obr. 88 Průběh hřídelového napětí *DE* – *kostra*; s kartáči na *DE* i *NDE*

### 4.1.3 Zkratovací kroužky

Další možností je kroužek AEGIS uKIT.



Obr. 89 Princip uhlíkového kruhu

Hřídelový proud se přenáší pomocí uhlíkových vláken, umístěných okolo hřídele. Velikost kotvicích patek je možné nastavit dle rozměrů stroje. Díry na kotvicí šrouby je nutno vyvrtat dle návodu výrobce. Dodávaná lepicí pasta zajišťuje po přitažení šroubů vodivý přitlak i v případě vibrační stroje. Kruh je tedy připojen ke kostře stroje přímo a bez kabelů. [31]

### 4.2 Izolování ložiska

Použití izolovaného ložiska je možné v případě, je-li proud způsoben naindukovaným hřídelovým napětím, pokud se proud neuzavírá ložiskem na opačné straně stroje či přes spojku pohonu. V jiném případě je nutné použití izolované spojky a izolování obou ložisek, zvláště pak pro kapacitní proudy. Keramicky izolované ložisko se dá použít s vnitřním izolovaným kroužkem, vnějším izolovaným kroužkem a nebo hybridní ložisko s valivými elementy z nitridu křemičitého ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). Stejným způsobem jako izolování ložisek je možné nanést vrstvu tlustou v řádu  $\mu\text{m}$  na hřídel. Použitím této technologie se zvyšují celkové náklady výsledného produktu.

Izolování ložisek nebo hřídelí pro použití asynchronního stroje řízeného pomocí statického měniče kmitočtu je bezvýznamné. Jelikož keramická vrstva působí pro vysokofrekvenční proudy jako kondenzátor.

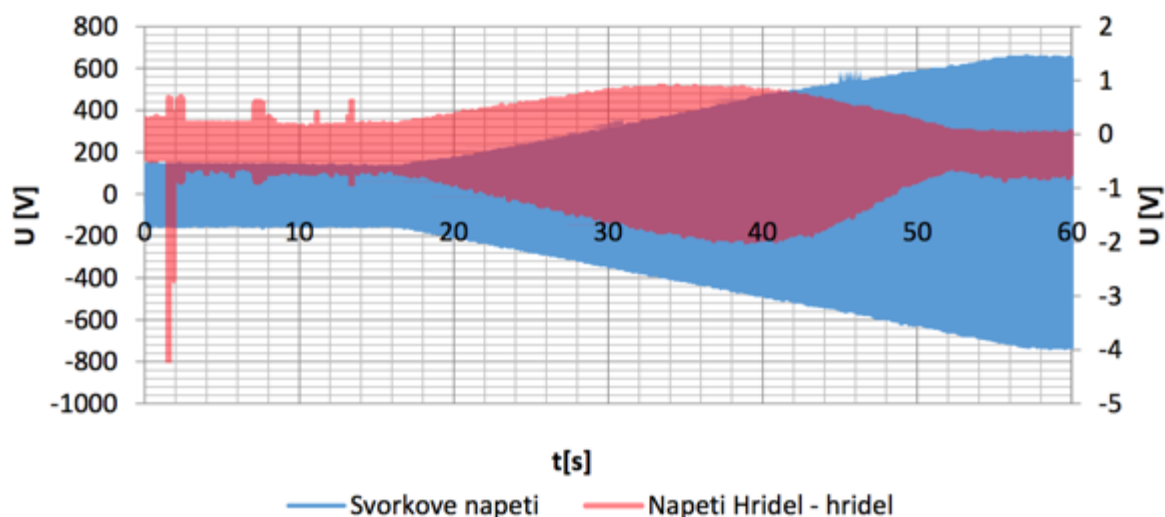
### 4.3 Natáčením plechů

Magnetický obvod motoru 1LE5533-3AB63-4AB0 byl realizován dvěma způsoby. Na dílně byly plechy magnetického obvodu tloušťky 0,535 mm seskládány klasicky s otáčením po  $180^\circ$ . Ve výsledku bylo hřídelové napětí *hřídel – hřídel* naměřeno  $U_{p+} = 1107 \text{ mV}$ ,  $U_{p-} = -1097 \text{ mV}$  a  $U_{ef} = 592 \text{ mV}$ . Experimentálně byl seskládán magnetický obvod se stejnou tloušťkou plechů, jako předešlý případ, plechy byly ovšem otáčeny o  $90^\circ$ . Výsledky měření hřídelového napětí *hřídel – hřídel* jsou  $U_{p+} = 56,7 \text{ mV}$ ,  $U_{p-} = -44 \text{ mV}$  a  $U_{ef} = 18,8 \text{ mV}$ . V obou případech bylo vinutí zapojeno jako K.



#### 4.4 Vliv svorkového napětí na hřídelové napětí

Na celkovou velikost hřídelového napětí má vliv svorkové napětí. Externím napájecím zdrojem bylo svorkové napětí z hodnoty 180V obr. 90. lineárně zvyšováno až do hodnoty zhruba 650V. Pomocí měřicích sond zapojených hřídel – hřídel bylo snímáno indukované hřídelové napětí. V rozsahu napájecího napětí  $350 \div 420\text{V}$  dosahuje maximální hodnota indukovaného napětí největší amplitudy, zhruba 0,85V. Při dalším zvyšování svorkového napětí amplituda indukovaného hřídelového napětí klesá.



Obr. 90 Závislost hřídelového napětí na svorkovém napětí

Nárůst a pokles amplitudy indukovaného hřídelového napětí lze přirovnat k magnetizační charakteristice použitého neorientovaného plechu tloušťky 0,535 mm. Do jmenovitého napětí stroje se pohybujeme v lineární oblasti magnetizační charakteristiky, v oblasti jmenovitého napětí se dostáváme do zlomu charakteristiky. Po dalším zvyšování napětí je již magnetický materiál přesycen a indukované hřídelové napětí klesá.

## 5 Závěr

Cílem mé diplomové práce bylo analyzovat hřídelové napětí, s možným vznikem ložiskových proudů. Ve spolupráci s firmou Siemens s.r.o. byly vybrány konstrukční nesymetrie, které by mohly mít výrazný vliv na vznik hřídelových napětí. Tyto nesymetrie byly experimentálně proměřeny a poté vyhodnoceny. Dle normy ČSN CLC/TS 60034-17 je limit pro špičkovou hodnotu hřídelového napětí způsobenou konstrukcí stroje  $U_{hipp} = \pm 500$  mV. Tato norma je určena pro napájení asynchronního motoru frekvenčními měniči. Pokud by hřídelové napětí ve stroji překročilo tuto hodnotu, není motor vhodný pro napájení z měniče frekvence.

Ve výsledku byla u všech vybraných nesymetrií naměřena téměř stejná velikost hřídelového napětí. Odlišnost byla zaznamenána jen na vzorku 1LE5533-3AB63-4AB0. Úpravou technologického postupu pak kleslo hřídelové napětí na zanedbatelnou hodnotu. Všechna měřená hřídelová napětí pro jmenovitý pracovní bod 400V se pohybovala v rozmezí  $590 \div 700$  mV. Což nesplňuje požadavek kladený normou ČSN CLC/TS 60034-17 a motory by tak nemohly být použity pro napájení z frekvenčních měničů. Z frekvenčního spektru bylo zjištěno, že deformace hřídelového napětí je způsobována lichými harmonickými složkami, především třetí, pátou a sedmou harmonickou složkou. Porovnáním řady 1LE5 a 1LE1, vykazovala řada 1LE5 vyšší hřídelové napětí a to proto, že magnetizační charakteristika motoru je blíže oblasti nasycení. Také nelze zajistit dokonalou symetrii vinutí sebelepším zapojením, vždy tu bude určitý faktor nesymetrie. Pro celkové indukované napětí je potřeba uvažovat s činitelem vinutí  $k_v$ . Na samotné indukované napětí by měl mít pozitivní vliv zkrácení kroku. Zkrácením kroku by amplituda indukovaného napětí neměla dosáhnout stejné velikosti jako při vinutí s celým krokem.

Měření bylo dále prováděno s použitím kartáčů Helwig Carbon. Kartáče byly umístěny po stranách motoru. Účelem byla ochrana ložisek před účinky ložiskových proudů. Při použití kartáčů došlo k mírnému nárůstu hřídelového napětí a větší deformaci vyššími harmonickými. Při použití sběracích kartáčů na obou stranách došlo k poklesu napětí a průchodu proudu přes litinovou kostru. Litinová kostra tvoří velmi malou hodnotu impedance, tudíž může proud procházející přes kostru dosahovat až desítek ampérů. Podobný princip paralelního svedení kapacitních proudů jako u kartáčů je použití kruhů, na ložiskovém štítu motoru.

Omezení nízkofrekvenčního hřídelového napětí je možné izolováním hřídele, izolováním spojky, použitím izolovaného ložiska. Pokud je motor napájen měničem frekvence, pak je také nutné upravit délku kabelu, přizpůsobit spínací frekvenci měniče a její amplitudu. Je potřeba uvažovat, že hřídelové napětí nese široké spektrum násobných harmonických a vinutí v elektrickém stroji se chová jako cívka. Vazby mezi jednotlivými závity jsou jako kapacity. Oba tyto náhradní pasivní prvky jsou frekvenčně závislé. Frekvenčně závislá je také hodnota pomyslného kondenzátoru, jež tvoří mazací vrstva mezi stykovými plochami ložiska. Průrazné napětí mazacího filmu se neustále mění, stejně tak se mění hodnota pomyslného kondenzátoru, jak se ložisko otáčí. Už ze samotných a zde prezentovaných principů vzniku hřídelových napětí vyplývá, že je nedílnou součástí provozních vlastností asynchronních strojů a nelze je zcela omezit. Velikost hřídelového napětí lze ovlivnit vhodně zvolenou kombinací konstrukčních faktorů. Je potřeba se zamyslet, kdy je hřídelové napětí důsledkem a kdy je příčinou. Je možné pouze eliminovat jeho velikost konstrukčními úpravami stroje, kterými jsem se ve své práci zabýval.

## 6 Použitá literatura:

- [1] BOLDEA, I. a S. A. NASAR. The induction machine handbook. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN 0-8493-0004-5.
- [2] BAŠTA, Jan. Měření na elektrických strojích: 4. Měření na indukčních strojích. Praha: SNTL, 1962.
- [3] HRABOVCOVÁ, Valéria. Meranie a modelovanie elektrických strojov. 3. vyd. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2014. Vysokoškolské učebnice. ISBN 9788055408521.
- [4] PETROV, Georgij Nikolajevič. Elektrické stroje 2. Praha: Academia, 1982.
- [5] KRUMOPLC, Eduard. Hřídelová napětí a ložiskové proudy u asynchronních strojů. Technika elektrických strojů – teoretické číslo 1983, VÚES Brno
- [6] CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů: Celost. vysokošk. učebnice. Praha: SNTL, 1958. Řada elektrotechnické literatury.
- [7] KOPYLOV, Igor Petrovič. Stavba elektrických strojů: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických. Praha: SNTL, 1988.
- [8] KUČERA, Jaroslav a Josef HAPL. Vinutí elektrických strojů točivých. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1959. Studie a prameny.
- [9] PYRHONEN, Juha., Tapani JOKINEN a Valeria. HRABOVCOVA . Design of rotating electrical machines. Hoboken, NJ: Wiley, c2008. ISBN 9780470695166.
- [10] SEQUENZ, Heinrich. Technologie vinutí elektrických strojů točivých. Přeložil Josef HAPL, přeložil Vladimír HOLUB. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1980.
- [11] CHMELÍK, Karel, Jiří POSPIŠILÍK a Jiří FOLDYNA. Ložiskové proudy v elektrických strojích: odborná publikace. Ostrava: VŠB-TU ve vydavatelství Montanex, 2008. ISBN 9788072252909.
- [12] MENTLÍK, Václav, 2008. Diagnostika elektrických zařízení. Praha: BEN - technická literatura. ISBN 9788073002329.
- [13] ALSAEDI A. M., Fault diagnosis of three-phase induction motor: Revue. Amarah, Iraq, 2015, s. 1-3, ISSN: 23287810, zdroj: SciencePG  
<http://www.sciencepublishinggroup.com/journal/paperinfo?journalid=126&doi=10.11648/j.optics.s.2015040101.11>
- [14] XIPING M. RUIFANG L. ZHENG B. YIHUANG Z., Analysis and calculation of capacitance parameters in induction machines to predict shaft voltage. Beijing, China, 2012, s 1-5, ISBN: 9784886860774, zdroj: IEEE <http://ieeexplore.ieee.org/document/6401725/>
- [15] STONE. G., LLOYD B., SASIC M., Monitoring of shaft voltages and grounding currents in rotating machines. Ontario, Canada, 2015, s.3, ISBN: 9781479951628, zdroj: IEEE <http://ieeexplore.ieee.org/document/7014072/>

[16] PLAZANET T., BOILEAU T., CAIRONI C., MOBARAKEH N.B., An overview of shaft voltages and bearing currents in rotating machines. Pulnoy, France, 2015, s.1-2, ISBN: 9781479983971, zdroj: IEEE, <http://ieeexplore.ieee.org/document/7731884/>

[17] ALGER P.L., SAMSON H.W., Shaft current in electric machines. USA, 1924, s 1325-1330, tištěné ISSN: 03606449, zdroj: IEEE <http://ieeexplore.ieee.org/document/6593419/>

[18] BULÍN T., ONDRŮŠEK Č., HUZLÍK R., Zařízení pro diagnostiku asynchronních motorů. Česká republika, 2016, sv.18, č. 2, s. 52-53, tištěné ISSN: 12131539, zdroj: elektorevue

<http://www.elektorevue.cz/cz/clanky/ostatni-1/0/zarizeni-pro-diagnostiku-asynchronnich-motoru--device-for-diagnostics-of-induction-machine-/>

[19] COSTELLO M J., Shaft Voltages and Rotating machinery. USA, 1993, s. 419-421, tištěné ISSN: 1939-9367, zdroj: IEEE, <http://ieeexplore.ieee.org/document/216553/>

[20] MÄKI P., LOUMI J., Induction Motor Model for the Analysis of Capacitive and Induced Shaft Voltages. Helsinki, Finland, 2005, s. 1653-1655, ISBN: 0-7803-8988-3, zdroj: IEEE <http://ieeexplore.ieee.org/document/1531559/>

[21] ROGOZIN G.G., OSIPOV D.Y. Induction Motor Eccentricity Diagnosis Using Impedance Spectrum and Shaft Voltage. XIX International Conference on Electrical Machines ICEM 2010, Rome, s. 1-3, ISBN: 978-1-4244-4175-4, zdroj: IEEE

<http://ieeexplore.ieee.org/document/1531559/>

Závěrečné práce:

[22] MUETZE A., *Bearing Currents in Inverter-Fed AC-Motors*. Německo, 2004, s. 10-30, tištěné ISSN: 19399367, zdroj: IEEE,

<http://www.ew.tu-darmstadt.de/media/ew/dissertationen/dissannette.pdf>

[23] POSPÍŠILÍK. J., Podmínky vzniku hřídelových napětí a ložiskových proudů při nesinusovém napájení elektrického stroje. Vysoká škola báňská - technická univerzita Ostrava, Česká republika, 2004, s. 12-22 a 65-71, zdroj: VŠB-TUO

Normy:

[28] ČSN CLC/TS 60034-17. Točivé elektrické stroje - Část 17: Asynchronní motory nakrátko napájené z měničů. Český normalizační institut. 2005.

[29] ČSN CLC/TS 60034-25. Točivé elektrické stroje - Část 25: Návod pro navrhování a vlastnosti střídavých motorů navržených speciálně pro napájení z měničů. Český normalizační institut. 2009.

Web:

[30] <http://www.helwigcarbon.com/products/bearing-protection.html>

[31] <http://www.est-aegis.com/shaft-grounding-ring/uKIT.php>

Skripta:

[32] MIŠÁK, S., Technická diagnostika, odborný syllabus. VŠB-TU, Ostrava. 2007